

České učení technické v Praze
Fakulta strojní
Ústav přístrojové a řídící techniky



Vnitřní lokalizace objektů v průmyslovém prostředí

Diplomová práce

Pavlína Šťastná

Magisterský program: Automatizační a přístrojová technika

Magisterský obor: Automatizace a průmyslová informatika

Vedoucí práce: doc Ing. Martin Novák Ph.D.

Praha, červen 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Šťastná** Jméno: **Pavlína** Osobní číslo: **475431**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav přístrojové a řídící techniky**
Studijní program: **Automatizační a přístrojová technika**
Specializace: **Automatizace a průmyslová informatika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Vnitřní lokalizace objektů v průmyslové prostředí

Název diplomové práce anglicky:

Internal localization of objects in an industrial environment

Pokyny pro vypracování:

1. Analýza UWB technologie pro účely lokalizace
2. Srovnání UWB technologie pro lokalizaci s jinými technologiemi, volba nevhodnější technologie pro daný požadavek
3. Návrh lokalizačního systému PoC navrženého lokalizačního systému
4. Experiment s vybranou technologií

Seznam doporučené literatury:

[1] Hözl, Michael & Neumeier, Roland & Ostermayer, Gerald. (2015). Localization in an Industrial Environment: A Case Study on the Difficulties for Positioning in a Harsh Environment. International Journal of Distributed Sensor Networks. 2015. 11. 10.1155/2015/567976.

[2] Laux, Hendrik & Bytyn, Andreas & Ascheid, Gerd & Karabulut Kurt, Gunes & Schmeink, Anke & Dartmann, Guido. (2018). Learning-Based Indoor Localization for Industrial Applications. CF '18: Proceedings of the 15th ACM International Conference on Computing Frontiers. 10.1145/3203217.3203227.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Martin Novák, Ph.D. odbor elektrotechniky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **28.04.2023** Termín odevzdání diplomové práce: **08.06.2023**

Platnost zadání diplomové práce: _____

doc. Ing. Martin Novák, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Tomáš Vyhlídal, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Vedoucí práce:

doc Ing. Martin Novák Ph.D.
Ústav přístrojové a řídící techniky
Fakulta strojní
České vysoké učení technické v Praze
Technická 4
160 00 Praha 6
Česká republika

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně, s tím, že její výsledky mohou být dále použity podle uvážení vedoucího diplomové práce jako jejího spoluautora. Souhlasím také s případnou publikací výsledků diplomové práce nebo její podstatné části, pokud budu uvedena jako její spoluautorka.

V Praze 2023

.....
Pavlína Šťastná

Abstrakt

Abstrakt: Cílem této diplomové práce je použití lokalizačního systému ve výrobní hale. Objektem lokalizace je slévarenské nářadí, které se vyrábí v mladoboleslavské Škoda Auto a.s. V rámci práce byla nejprve provedena rešerše v oblasti technologií, které vyhovují definovaným požadavkům plynoucím z reálného provozu ve výrobní hale. Nejhodnějších parametrů ze zkoumaných technologií dosahovala technologie Ultra-Wide Band. Pro ověření vlastností vybrané technologie byly zapůjčeny hardware komponenty založené na modulu Ultra-Wide Band, navrhnuty konkrétní experimenty a vytvořen patřičný software pro odběr, uložení a zpracování lokalizačních dat. Experimenty se soustředily zejména na ověření přesnosti v různých podmínkách. Součástí experimentů bylo vytvoření programů pro statistické využití dat. Na závěr byla provedena funkční zkouška ve výrobní hale a zhodnocena použitelnost vybrané technologie v provozních podmínkách.

Klíčová slova: Lokalizace ve vnitřním průmyslovém prostředí, Lokalizace v reálném čase, Ultra-Wide Band

Abstract: The aim of this thesis is to use a localization system in a production hall. The object of localization is foundry tools, which are produced in Škoda Auto a.s. in Mladá Boleslav. Within the scope of the thesis, firstly, a research was carried out in the field of technologies that meet the defined requirements resulting from the functioning in the production hall. Ultra-Wide Band technology achieved the most suitable parameters among the technologies investigated. In order to verify the characteristics of the selected technology, hardware components based on the Ultra-Wide Band module were borrowed, specific experiments were designed and appropriate software was developed to collect, store and process the location data. The experiments mainly focused on verifying the accuracy under different conditions. The experiments also included the development of programs for statistical evaluation of the data. Finally, a functional test was performed in the production hall.

Keywords: Localization in indoor industrial environment, Real-time localization, Ultra-Wide Band

Poděkování

Ráda bych touto cestou vyjádřila poděkování doc. Ing. Martinu Novákovi Ph.D. za jeho cenné rady, doporučení a trpělivost při vedení mé diplomové práce. Ráda bych také poděkovala své rodině, partnerovi a všem přátelům, kteří mě při vytváření této práce podpořili, a bez jejichž pomoci by nebylo možné práci dokončit.

Dále bych rovněž chtěla poděkovat firmě Sewio za zapůjčení testovacího kitu, bez kterého by nebylo možné uskutečnit praktickou část této práce. Rovněž děkuji i za věcné rady, které mi byly v průběhu práce s kitem poskytnuty.

Seznam obrázků

2.1	Současný způsob skladování palet s díly	4
2.2	Ukázka prostředí nářadovny	6
2.3	Půdorys výrobní haly	7
2.4	Ukázka dílu s papírovou dokumentací	8
4.1	Schéma RTLS	12
6.1	Rozvržení antén při instalaci	22
6.2	Ukázka přímé (LOS) a nepřímé (NLOS) viditelnosti mezi vysílači [33]	23
6.3	Topologie	24
6.4	Parametr RSSI [35]	25
6.5	Parametr FP [36]	26
6.6	Ukázka správné synchronizace kotev pomocí ukazatelů SD, FP a RSSI	27
6.7	Ukázka špatné synchronizace skrze parametr SD	28
6.8	Schéma zapojení	29
6.9	Režimy spánku [37]	31
6.10	Vyhodnocení - 3D graf	35
6.11	Barevná škála	36
6.12	Vyhodnocení - opsaná kružnice	37
6.13	Vyhodnocení - konvexní obal	38
6.14	Vyhodnocení - vypočtené středy naměřené množiny bodů	39
6.15	Laboratoř robotů	41
6.16	Zobrazení měřených poloh tagů	42
6.17	Laboratoř elektromotorů	45
6.18	Půdorys laboratoře motorů	47
6.19	Vyhodnocení 3D graf - první (nezarušené) měření poloha 1	48
6.20	2D Vyhodnocení - první (nezarušené) měření poloha 1	49
6.21	Vyhodnocení 3D graf - druhé (zarušené) měření poloha 1	51
6.22	2D vyhodnocení - druhé (zarušené) měření poloha 1	52
6.23	Porovnání 3D grafů - poloha 1	54
6.24	Vyhodnocení 3D graf - první (nezarušené) měření poloha 2	57
6.25	2D Vyhodnocení - první (nezarušené) měření poloha 2	58
6.26	Vyhodnocení 3D graf - druhé (zarušené) měření poloha 2	59
6.27	2D Vyhodnocení - druhé (zarušené) měření poloha 2	60
6.28	Porovnání 3D grafů - poloha 2	61
6.29	Testovací oblast	65
6.30	Půdorys testovací plochy s vyznačenými zónami	66
6.31	Pokrytí testovací oblasti	66
6.32	Umístění lokalizačního zařízení	67

6.33 Zážnam pořízený v průběhu zkoušky	68
--	----

Seznam tabulek

5.1	Porovnání zkoumaných technologií	19
6.1	Vypočtené vzdálenosti od referenční hodnoty - vzor	39
6.2	Vypočtené vzdálenosti od referenční hodnoty - poloha 1	43
6.3	Statistické vyhodnocení - poloha 1	43
6.4	Vypočtené vzdálenosti od referenční hodnoty - poloha 2	43
6.5	Statistické vyhodnocení - poloha 2	44
6.6	Analytické a statistické vyhodnocení - první (nezarušené) měření poloha 1	50
6.7	Analytické a statistické vyhodnocení - druhé (zarušené) měření poloha 1	53
6.8	Analytické a statistické vyhodnocení - porovnání měření poloha 1	55
6.9	Variační koeficient - porovnání měření poloha 1	56
6.10	Vypočtené vzdálenosti od referenční hodnoty porovnání - poloha 1	56
6.11	Analytické a statistické vyhodnocení - první (nezarušené) měření poloha 2	58
6.12	Analytické a statistické vyhodnocení - druhé (zarušené) měření poloha 2 .	60
6.13	Analytické a statistické vyhodnocení - porovnání měření poloha 2	62
6.14	Variační koeficient - porovnání měření poloha 2	62
6.15	Vypočtené vzdálenosti od referenční hodnoty porovnání - poloha 2	63
7.1	Shrnutí dosažených přesností	70

Seznam kódů

6.1	Vytvoření spojení	30
6.2	Struktura příchozích dat 1	33
6.3	Struktura příchozích dat 2	33
6.4	Off-line vykreslení výsledků lokalizace	34

Seznam zkratek

AFH Adaptive Frequency Hopping - adaptivní frekvenční přeskoky. 16

AoA Angle of Arrival. 13, 14, 16

BLE Bluetooth Low Energy — nízko-výkonové Bluetooth. 16

CD Compact Disc - kompaktní disk. 21

CNC Computer Numerical Control - počítačové numerické řízení. 65–67

ERP Enterprise Resource Planning - plánování podnikových zdrojů. 5

FP First Path. 25, 26

GPS Global Positioning System - globální polohový systém. 12

GUI Graphic User Interface - grafické uživatelské rozhraní. 24

HW Hardware. 19, 24

IoT Internet of Things – internet věcí. 1

IP Ingress Protection — stupeň krytí. 8, 10

IPS Indoor Positioning System — vnitřní polohovací systémy. 1, 2, 5, 13, 18

ISM Industrial, Scientific and Medical - bezlicenční pásmo určené pro průmyslové, vědecké a zdravotnické použití. 15–17, 20

JSON JavaScript Object Notation - JavaScriptový objektový zápis. 28, 32

LokNa Lokalizace nářadí. 3, 8

MES Manufacturing Execution System — výrobní informační systém. 7

PoE Power over Ethernet. 22

RFID Radio Frequency Identification — radio-frekvenční identifikace. 16, 17

RSS Received Signal Strength - síla přijímaného signálu. 13

- RSSI** Received Signal Strength Indication - indikace síly přijímaného signálu. 13–18, 20, 25, 26
- RTLS** Real-Time Locating Systems - systémy pro sledování v reálném čase. 11, 12, 23, 24, 28
- SD** Second Difference. 25, 26
- TCP** Transmission Control Protocol. 23, 28
- TDoA** Time Difference of Arrival. 13, 14
- ToA** Time of Arrival. 13, 14
- ToF** Time of Flight. 13, 14, 18, 20
- UWB** Ultra-Wide Band — ultra-široká technologie. 17, 18, 20, 21, 40, 44, 46, 63, 65, 68–70
- Wi-Fi** Wireless Fidelity. 15–18, 20, 23
- ČVUT** České Vysoké Učení Technické v Praze. 21, 40

Obsah

Prohlášení	iv
Abstrakt	v
Poděkování	vi
Seznam obrázků	vii
Seznam tabulek	ix
Seznam kódů	x
Seznam zkratek	xi
1 Úvod	1
2 Lokalizace ve výrobní hale	3
2.1 Současný stav	3
2.2 Cílový stav	5
2.3 Požadavky pro lokalizaci	5
2.3.1 Charakterizace prostředí	5
2.3.2 Prostory lokalizace	6
2.3.3 Popis procesu, lokalizovaný objekt	7
2.3.4 Ostatní specifika	8
3 Cíle práce	10
4 Přehled vhodných technologií	11
4.1 RTLS	11
4.1.1 Techniky zjišťování polohy a lokalizační algoritmy	12
4.1.2 Wi-Fi	15
4.1.3 Bluetooth Low Energy	16
4.1.4 RFID	16
4.1.5 UWB	17
5 Výběr technologie	19
6 Experiment	21
6.1 Realizace experimentů	22
6.1.1 Rozložení kotev	22

6.1.2	Připojení na síť	23
6.1.3	Inicializace a synchronizace	24
6.1.4	Přenos dat	28
6.1.5	Lokalační tag použitý při experimentech	30
6.1.6	Zaměření referenční hodnoty	31
6.2	Obecný popis experimentů	32
6.3	Způsob zpracování a vyhodnocení dat	32
6.3.1	Vykreslení do 3D grafu	34
6.3.2	Opsaná kružnice	37
6.3.3	Konvexní obal	37
6.3.4	Geometrický medián, aritmetický průměr, nejčastější hodnota 3D graf	38
6.3.5	Rozptyl, směrodatná odchylka, variační koeficient	40
6.4	Experiment v laboratoři robotů	40
6.4.1	Poloha 1	42
6.4.2	Poloha 2	43
6.4.3	Vyhodnocení	44
6.5	Experiment v laboratoři elektromotorů	45
6.5.1	Výsledky z experimentu - poloha 1	48
6.5.2	Porovnání výsledků experimentu - poloha 1	54
6.5.3	Výsledky z experimentu - poloha 2	57
6.5.4	Porovnání výsledků experimentu - poloha 2	61
6.6	Shrnutí experimentů	63
6.7	Test v průmyslovém prostředí	65
7	Závěr	69
A	Zpracování naměřených dat	71
B	CD	72
Bibliografie		75

Kapitola 1

Úvod

Lokalizace uvnitř budov se v posledních letech stala klíčovým tématem. Většina z nás stráví velkou část svého času v uzavřených prostorách, ať už se jedná o kancelářské budovy, obchodní centra, nemocnice nebo průmyslové budovy. Proto je velmi důležité mít přesné informace o poloze, pohybu a aktivitách osob nebo objektů uvnitř těchto budov.

Vnitřní lokalizace obecně označuje proces určování polohy předmětů nebo osob uvnitř budov. Své uplatnění najde v mnoha oblastech, od zdravotnictví, logistiky, maloobchodu, montáže až po správu inteligentních budov. S rozvojem nových technologií, jako je IoT (Internet of Things – internet věcí), strojové učení a počítačové vidění, existuje nyní celá řada způsobů, jak lokalizaci uvnitř budov realizovat.

Lokalizace v průmyslových prostorách je, co do definice, totožná té, která byla popsána ve druhém odstavci. Tedy proces určování polohy předmětů nebo osob uvnitř budov. Avšak co se týče konkrétní aplikace, je zde podstatný rozdíl. Lokalizace v industriálním prostředí se soustředí zejména na určování polohy (umístění) osob, předmětů, strojů a materiálů v továrnách, výrobních, montážních nebo skladových halách. Z toho plyne, že podmínky pro samotnou realizaci lokalizace a implementaci IPS (Indoor Positioning Systems — vnitřní polohovací systémy) jsou častokrát mnohem náročnější. Proto nalezení správného lokalizačního řešení vyžaduje kombinaci technických odborných znalostí a znalostí v dané oblasti pro přesné porozumění specifickým požadavkům každého průmyslového prostředí. Z toho důvodu je lokalizace uvnitř průmyslových budov nelehkou otázkou a neexistuje jedno univerzální řešení, které by vyhovovalo všem oblastem použití.

Uplatnění lokalizačních systémů je v soudobém průmyslovém světě stále častější záležitostí, a to zejména díky velkému množství výhod, které IPS nabízí. Schopnost přesně určit polohu sledovaného objektu má zásadní význam při sledování pohybu materiálu, výrobků a zařízení v průběhu výrobního procesu. Na základě toho lze optimalizovat logistické postupy, provozy a transitory a zlepšit tak celkovou efektivitu výrobních procesů. Zefektivnění výrobních procesů má dopad na hospodářské výsledky podnikání jako zvý-

šení produktivity, snížení prostojů nebo zlepšení kontroly kvality. V tomto kontextu hraje lokalizace zásadní roli při budování tzv. chytrých továren a iniciativ Průmyslu 4.0.

Velký přínos mají IPS i v oblasti minimalizace rizika vzniku zranění. Sledováním polohy zaměstnanců lze předejít potenciálním nehodám, kolizím a zraněním na pracovišti a zajistit tak maximální možnou bezpečnost.

Kromě všech výše zmíněných výhod lze z dat generovaných lokalizačními technologiemi získat vhled do provozu a identifikovat oblasti, které je třeba zdokonalit. To může přispět ke zkvalitňování všech procesů a umožnit tak společnostem udržet si náskok před konkurencí v dnešním rychle se vyvíjejícím průmyslovém světě.

Kapitola 2

Lokalizace ve výrobní hale

Téma pro zpracování této diplomové práce vyplývá z požadavků reálného provozu ve firmě Škoda Auto a.s a zaměřuje se na užití lokalizační technologie v jedné z hal společnosti. V současné době jsou v provozu lokalizační systémy v montážních halách a v logistice. Nicméně účelem této práce (projektu) je návrh a realizace lokalizačního řešení v hale výrobní, což s sebou nese řadu překážek, a výrazně se tak liší od způsobu použití ve zmíněných halách, kde je uplatnění lokalizačních systémů pro sledování rozličných objektů již poměrně rutinní záležitost.

Hlavním podnětem pro řešení problematiky lokalizace nářadí ve výrobní hale byla snaha odstranit nedostatky, které plynou z chodu provozu. Jedná se zejména o eliminaci neproduktivních časů, zrychlení realizace zakázek a automatizaci mezioperačních transportů. Všechny zmíněné nedostatky byly prvním impulzem ke vzniku projektu lokalizace nářadí - projekt LokNa (Lokalizace Nářadí).

Následující podkapitoly vysvětlují současný proces fungování ve výrobní hale a jeho zásadní vady. Jsou zde zároveň uvedeny i přínosy, kterých lze docílit zavedením lokalizačního systému.

2.1 Současný stav

Jak již bylo zmíněno, lokalizace má probíhat ve výrobní hale Škoda Auto s interním označením V17 - nářaďovna. Na hale jsou vyráběny a renovovány formy pro lisovací, ko-várenské a slévárenské nářadí. V rané fázi projektu je uvažováno o sledování pouze nových forem pro tlakové lití. Každá forma se skládá ze dvou hlavních částí (vrchní a spodní část), každá část se dále dělí na zhruba 25 velkých a výrobně komplikovaných dílů. Sestavením jednotlivých dílu dohromady vznikne vrchní a spodní část a složením těchto dvou částí dohromady vznikne forma. Jednotlivé díly během svého zhotovení procházejí jednotlivými výrobními operacemi. Výrobními operacemi se rozumí konkrétní strojní úkony, tedy např.

operace soustružení, operace frézování apod.

V současné době zajišťují přesuny nářadí mezi dílčími výrobními operacemi týmoví koordinátoři nebo technici řízení výroby na základě obchůzky. Skutečný stav výroby (tj. rozpracovanost) je zjišťován na základě zmíněných obchůzek příslušnými pracovníky. Mezi operační transport není nijak provázán s plánovacím systémem a v tom důsledku dochází k přeplnění pracovišť s připravenou a hotovou prací.¹

Dalším problémem je samotná identifikace jednotlivých dílů formy. Tato informace je uvedena v technologickém postupu a výkresu. Oba tyto dokumenty jsou v papírové podobě přiloženy k vyráběnému dílu (pozici). Při hledání konkrétního dílu (pozice) musí tudíž obsluha stroje, výrobní koordinátor, technolog nebo konstruktér procházet velké množství papírové dokumentace pro nalezení hledaného dílu (pozice).

Následující obrázky zachycují přeplněné pracoviště s připravenou a hotovou prací. Na obrázku je rovněž vidět přiložená papírová dokumentace, která putuje s každým dílem (zelené a modré dokumenty).



(a) Přeplněná pracoviště s připravenou prací



(b) Přeplněná pracoviště s hotovou prací

Obrázek 2.1: Současný způsob skladování palet s díly

¹Připravenou prací se rozumí nářadí, které je připraveno k obrobení na konkrétním strojném pracovišti (soustruh, frézka, apod.). Naopak hotová práce označuje nářadí, které bylo obrobeno, sejmuto ze stroje a je nachystané k převozu na další výrobní operaci.

2.2 Cílový stav

Implementací lokalizační technologie do provozu bude možné on-line sledovat proces výroby nových forem. Tím dojde k získání přehledu o aktuální poloze všech vyráběných dílů (pozic) v reálném čase. Tudíž odpadne hledání konkrétního dílu po hale a procházení velkého množství papírové dokumentace.

Integrací lokalizačního systému do ERP (Enterprise Resource Planning - plánování podnikových zdrojů) systému nářaďovny bude možné uvažovat o nasazení autonomního transportu dílů mezi dílcími výrobními operacemi. Tedy automatické odeslání požadavku pro transport logistice v okamžiku, kdy bude díl dokončen a připraven k přepravě na další výrobní operaci.

Další očekávané výhody, které plynou z použití IPS, jsou:

- Eliminace neproduktivních časů a zrychlení realizace zakázek,
- Jednoznačná identifikace dílů a snížení chybovosti při jejich hledání,
- Řešení nedostatku výrobních a skladových ploch,
- Přechod na bez-papírovou dokumentaci.

2.3 Požadavky pro lokalizaci

2.3.1 Charakterizace prostředí

Prostory nářaďovny představují z radio-frekvenčního pohledu velmi náročné prostředí. V celé budově se nachází obrovské množství velkých elektromotorů, které generují elektromagnetické rušení v širokém spektru frekvencí (obráběcí stroje, centra, jeřáby apod.). Hala je současně naplněna i nástroji pro zhotovování rozměrných výlisků (raznicemi), tedy ocelovými objekty o půdorysu zhruba 11 m^2 (cca $4,5 \times 2,5 \text{ m}$) a výšce přes 1 m. Kromě raznic se v hale nachází nespočet obráběcích strojů, lisů a jiných masivních objektů. Jejich konstrukce je převážně kovová a kromě elektromagnetického rušení představují i velkou pasivní překážku pro šíření signálu.

Na obrázku 2.2 je vidět prostředí nářaďovny. Jsou zde velká obráběcí centra, masivní kusy železa, raznice, lisy a portálové jeřáby. Všechny tyto činitelé dohromady tvoří komplikované prostředí pro realizaci a implementaci lokalizační technologie.



(a) Manipulační trasa



(b) Pracoviště obráběcího centra

Obrázek 2.2: Ukázka prostředí nářadovny

2.3.2 Prostory lokalizace

V rámci pilotního projektu je celková plocha lokalizace (tj. plocha, která má být sledována) odhadnuta na $9\ 216\ m^2$. Budova nářadovny je v celé šířce rozdělena do třinácti částí tzv. lodí. Každá loď je vymezena dvěma sloupy, které jsou v obrázku 2.3 označeny čísly. Šířka jedné lodi je 24 m. Písmena pak představují jednotlivé sektory dané lodi. Sektory jsou, stejně jako lodě, rozděleny sloupy a délka jednoho sektoru je 12 m. Celou sledovanou plochu je nezbytné rozdělit do 9 zón, ve kterých bude sledován pohyb nářadí. Každá zóna reprezentuje konkrétní pracoviště výrobní operace (pracoviště nástrojařů, pracoviště soustruhů apod.). Vzhledem k tomu, že jednotlivá pracoviště se vyskytují vedle sebe a nejsou oddělena nebo jsou oddělena pouze opticky, je zde nutné lokalizovat s přesností na 30 cm.

Jednotlivé zóny jsou v obrázku níže zobrazeny modře zabarvenými plochami. V případě pracovišť, která mají samostatný vjezd, stačí detekovat pouze průjezd touto branou. Těchto bran bylo stanoveno 5 a jsou vyznačeny červenými značkami.



Obrázek 2.3: Půdorys výrobní haly

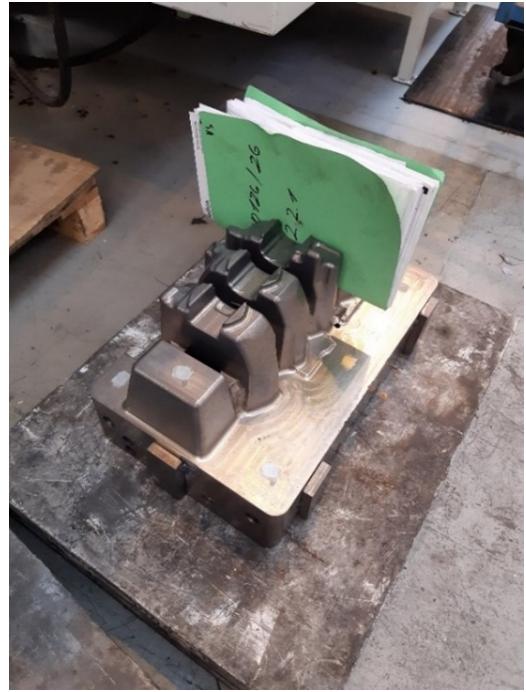
2.3.3 Popis procesu, lokalizovaný objekt

Hlavním předmětem lokalizace, jak již bylo zmíněno, jsou díly formy pro slévárenské nářadí. Jednotlivé díly prochází výrobním cyklem (procesem), který začíná dopravou materiálu na paletě. Materiál (dále už jako díl) prochází výrobní cestou, která je přesně definována v lokálním MES (Manufacturing Execution System — výrobní informační systém). Součástí palety s dílem je i přiložená papírová dokumentace s technologickým postupem a výkresy. Po dokončení konkrétní výrobní operace (např. soustružení, frézování apod.) je díl transportován na další operaci dle výrobního postupu. Výrobní doba nové formy, s takto popsaným postupem, trvá zhruba 6 měsíců. Na hale se současně vyrábí zhruba 4 nové formy, což odpovídá 200 kusů dílů, které mají být lokalizovány.

Obrázek 2.4 ukazuje materiál na začátku procesu a finální díl na konci výrobního cyklu. Při výrobě nového dílu dochází k obrobení všech ploch materiálu. Na obrázku je znova vidět přiložená papírová dokumentace.



(a) Díl na začátku procesu



(b) Finální podoba dílu

Obrázek 2.4: Ukázka dílu s papírovou dokumentací

2.3.4 Ostatní specifika

Vzhledem k charakteru sledovaných objektů (tj. faktu, že při výrobě dochází k opracování každé plochy) není možné pevné připevnění jakéhokoliv sledovacího zařízení přímo na povrch objektu. Dále musí sledovací zařízení splňovat minimálně tyto požadavky:

- Minimální stupeň ochrany IP (Ingress Protection — stupeň krytí) 67,
- Výdrž baterie 12 měsíců (předpokládaná obnovovací frekvence 1 - 3 s při pohybu),
- Provozní teplota sledovacího zařízení odpovídá teplotním podmínkám na hale (tj. 18° - 25°).

Žádné další požadavky v této diplomové práci uváděny nebudou, neboť kritéria popsaná v tomto rozsahu jsou postačující a lze na jejich základě vybrat vhodnou technologii. Nicméně v rámci technických požadavků pro projekt LokNa jsou dále definovány specifikace na:

- Zobrazení a ukládání lokalizačních dat,
- Aplikační architektura,
- Technologická architektura,

- Bezpečnost,
- Provozní činnosti,
- Provoz a údržba.

Kapitola 3

Cíle práce

Cílem této diplomové práce je návrh vhodného lokalizačního řešení dle parametrů, které byly definovány v kapitole 2.3. Základními požadavky jsou:

- Jednoznačně identifikovat a lokalizovat sledovaný objekt s přesností 30 cm,
- Minimální stupeň ochrany IP 67 všech zařízení,
- Výdrž baterie lokalizačního zařízení 12 měsíců (předpokládaná obnovovací frekvence 1 - 3 s při pohybu),
- Provozní teplota lokalizátoru odpovídá teplotním podmínkám na hale (tj. 18°- 25°).

Na základě navrženého řešení a k němu vytvořených funkčních specifikací lze integrovat lokalizační systém do výrobní haly v mladoboleslavské Škoda Auto.

Konkrétní cíle:

- Seznámení se s problematikou lokalizace objektů ve vnitřních průmyslových prostorách, jako jsou logistické, výrobní či montážní haly.
- Ze získaných informací vypracovat rešerši v oblasti dostupných technologií. Rozhodovací kritérium při zpracovávání rešerše bude nejen použitelnost technologie pro lokalizaci uvnitř industriálních objektů, ale i splnění všech požadavků.
- Rozhodnout, která ze zkoumaných technologií nejlépe splňuje zadané požadavky.
- Podrobení této technologie praktickým zkouškám, její ověření a porovnání teoretických a praktických vlastností. V těchto experimentech bude zejména hodnocena přesnost vybrané technologie, jakožto klíčové rozlišovací kritérium.

Kapitola 4

Přehled vhodných technologií

V rámci této části byly prozkoumány technologie, které umožňují jednoznačně identifikovat a lokalizovat sledovaný objekt v čase. Souhrnný název pro všechny technologie, které těmito vlastnostmi disponují, je RTLS (Real Time Location Systems – lokalizační systémy v reálném čase). Význam těchto systémů je vysvětlen dále v textu. Vlastnosti vybraných technologií byly porovnány a zhodnoceny na základě požadavků definovaných v kapitole 2.3. Z těchto technologií byla zvolena ta, která ze všech posuzovaných technologií nejlépe splňovala zadané parametry.

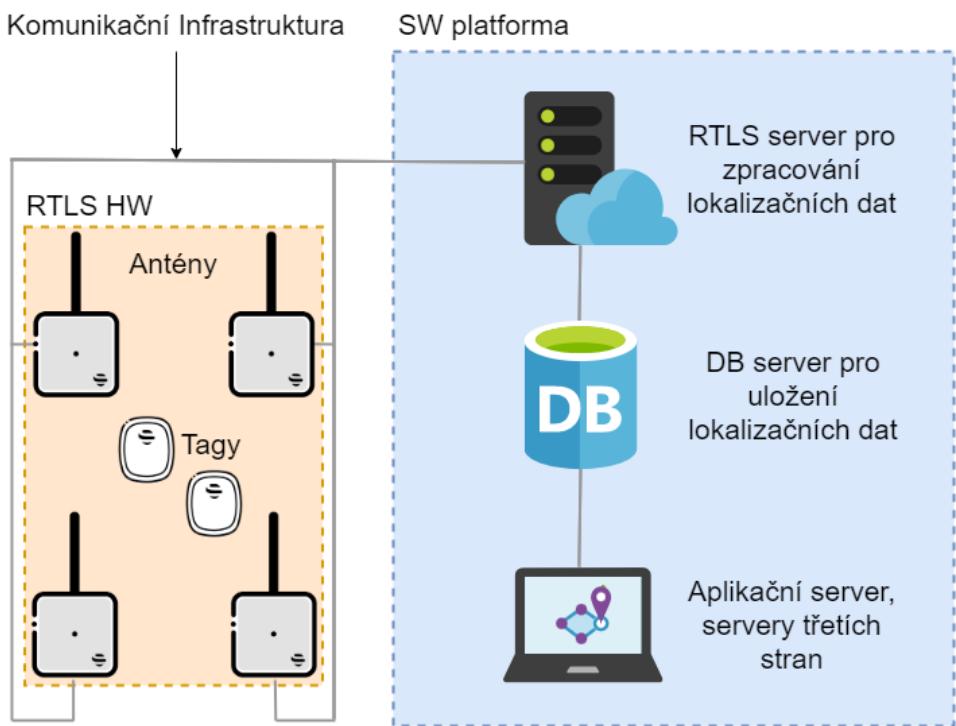
4.1 RTLS

Zkratka RTLS označuje jakýkoli systém (technologii), který přesně identifikuje a určuje polohu hledaného předmětu nebo osoby v čase. RTLS tedy není chápán jako specifický typ systému nebo technologie, ale jde o kombinaci hardwaru, softwaru a komunikačních technologií, které poskytují informace o poloze sledovaného aktiva v reálném čase. [1]–[4]

Základní součástí všech RTLS jsou lokalizační zařízení (vysílač, tag, štítek, transpondér), přijímače (kotva, anténa, gateway, maják), komunikační infrastruktura a softwarová platforma. Lokalizační zařízení se připevňují k předmětům i osobám, jejichž poloha má být sledována (monitorována). Přijímače jsou zařízení strategicky rozmištěny po celém lokalizovaném prostředí, aby detekovaly a přijímaly signály z tagů. Komunikační infrastruktura zprostředkovává přenos dat mezi vysílači, přijímači a softwarovou platformou. Softwarová platforma zpracovává přijatá data, analyzuje je, ukládá a poskytuje koncovým uživatelům informace o poloze v reálném čase prostřednictvím uživatelsky přívětivých rozhraní. [1], [3], [5], [6]

Všechny následně uvedené technologie spadají pod definici RTLS a skládají se z popsaných součástí. V rámci popisu dílčích technologií bude diskutována pouze hardwarová stránka vybraných technologií, neboť zbylé části mohou být totožné pro různé systémy

a nemají vliv na výsledné fungování technologie. Základní části RTLS jsou schématicky znázorněny na obrázku 4.1. [1], [5], [6]



Obrázek 4.1: Schéma RTLS

Ještě před popisem samotných technologií je zde krátce uvedena technologie GPS (Global Positioning System - globální polohový systém) a její souvislost s lokalizací uvnitř budov, neboť pro mnohé uživatele je systém GPS jednoznačnou a intuitivní volbou při řešení otázky lokalizace.

Technologie GPS je široce používána pro určování polohy ve venkovním prostředí, avšak při poskytování přesných informací o poloze uvnitř budov je z velké části nedostatečná. Je to zejména způsobeno tím, že GPS signály stěží pronikají skrze stěny, stropy, železné konstrukce a podobné bariéry. Jakákoli fyzická překážka způsobuje oslabení nebo odrazy signálu, které mohou způsobit jeho interferenci či zkreslení, a to má za následek nespolehlivé výsledky lokalizace. [7]–[9]

Z výše popsaných důvodů není vhodné použít technologii GPS k určování polohy uvnitř jakýchkoli objektů a je třeba využít jiných technologií k tomu určených.

4.1.1 Techniky zjišťování polohy a lokalizační algoritmy

Letmé vysvětlení této problematiky je důležité, neboť jednotlivé níže popsané technologie se od sebe odlišují mimo jiné i na základě použitých technik a metod lokalizace, a proto je vhodné zde tuto problematiku stručně uvést.

K vypočtení polohových dat v rámci IPS je obecně možné využít celkem 3 typy informací (proměnných) ze senzoru: [10]–[12]

1) Úhel dopadu signálu

Pomocí směrových antén na přijímači lze určit velikosti úhlů mezi dopadajícím paprskem signálu z vysílače a spojnicí mezi přijímacími zařízeními o známé vzdálenosti. Situaci si lze představit jako pomyslný trojúhelník, jehož vrcholy jsou tvořeny dvěma přijímači a jedním vysílačem. Směrové antény odhadují velikosti úhlů u vrcholů tvořených přijímači.

2) Čas šíření signálu

Časem šíření signálu se rozumí doba, za kterou signál odeslaný z vysílače doputuje do přijímače. A protože rychlosť šíření určitého druhu signálu médiem je konstantní, je možné dopočítat vzdálenost mezi přijímačem a vysílačem.

3) Síla signálu

Sílu signálu lze snadno změřit na přijímači, který přijímá signál z vysílače. Pomocí síly signálu a celkového útlumu je možné vypočítat vzdálenost mezi přijímacím a vysílacím zařízením. Je-li vzdálenost větší, síla signálu slábne v důsledku útlumu cesty.

Nejpoužívanějšími technikami pro výpočet vzdálenosti mezi přijímačem a vysílačem jsou RSSI (Received Signal Strength Indication - měření síly přijímaného signálu), ToA (Time of Arrival)/ToF (Time of Flight) a TDoA (Time Difference of Arrival). Nejčastěji používaná technika pro odhad úhlů dopadu se nazývá AoA (Angle of Arrival). [10]–[12]

RSSI

RSSI je přístup založený na síle přijímaného signálu a je jedním z nejjednodušších a široce používaných přístupů pro vnitřní lokalizaci. Skutečná síla signálu se nazývá RSS (Received Signal Strength - síla přijímaného signálu) a lze ji použít k odhadu vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem. Čím vyšší je hodnota RSS, tím menší je vzdálenost mezi přijímačem a vysílačem. Ačkoliv se jedná o metodiku, která je v praxi velmi často využívaná, její přesnost je výrazně ovlivněna různými faktory. Překážky při šíření signálu (stěny, předměty) a jejich následné odrazy, rušení od jiných zařízení, pohybující se objekty nebo případná interference signálu. Nachází-li se mezi přijímačem a vysílačem překážka, RSS dosahuje nižších hodnot, nicméně to explicitně neznamená větší vzdálenost mezi zařízeními. Technologie využívající tuto metodu obecně nedosahují dobrých výsledků při lokalizaci. Na druhou je stranu tato metoda velice jednoduchá, levná a snadno implementovatelná. [7], [10]–[15]

ToA/ToF

Metoda ToA/ToF vychází z přesné synchronizace času příchodu signálu vyslaného z vysílače do dostupných přijímačů. Vysílač odesílá signál s časovým razítkem směrem k přijímačům. Po jeho přijetí se z časového zpoždění přenosu (doba letu paprsku mezi přijímačem a vysílačem) a odpovídající rychlosti šíření signálu v prostředí vypočítá vzdálenost mezi vysílacím a přijímacím zařízením. Tato metoda vyžaduje přesnou synchronizaci všech zařízení s přesným zdrojem času, což v některých případech může činit problém. [10]–[12], [15]

TDoA

V případě techniky TDoA se časový rozdíl zjišťuje mezi více dvojicemi přijímacích zařízení se známou polohou a místo absolutního měření času (jako tomu bylo v ToA) se používá relativního měření času v každém přijímači. TDoA tak nevyžaduje přesnou synchronizaci vysílacího i přijímacího zařízení zároveň, ale pouze synchronizaci přijímačů. Signál, který je odeslán z vysílače s neznámým počátečním časem, je přijat v různých přijímačích. Časy příchodu signálu a známé vzdálenosti mezi přijímači jsou zpracovány. Výsledkem této metody jsou hyperbolické křivky v lokalizačním prostoru, jejichž ohnisky jsou přijímací zařízení známé polohy. Průsečík všech vypočtených hyperbolických křivek určuje možné umístění vysílače. [7], [10], [11], [15]

Jednou z nevýhod přístupu měření doby průchodu signálu je požadavek na přesnou časovou synchronizaci zařízení, a tudíž vyšší náklady a složitější implementace. Nicméně metody založené na tomto principu poskytují nejpřesnější výsledky při určování polohy ve vnitřním prostředí a jako jediné ze zmíněných metod dokáží alespoň částečně odfiltrovat vícecestné efekty při rušení nebo odrazech signálu. [10], [11]

AoA

Technika AoA určuje úhel příchodu signálu z vysílacího zařízení do všech dostupných přijímačů pomocí všesměrových antén, kterými jsou přijímače vybaveny. Ačkoliv tato metodika poskytuje kvalitnější výsledky než RSSI i technika založena na AoA má své omezení. Vyžaduje další antény se schopností měřit úhly, což poměrně výrazně zvyšuje náklady na implementaci systému. Stejně jako metoda RSSI je i AoA náchylná na vícecestné šíření signálu, spolu s odrazy od stěn a jiných objektů. Kvůli těmto faktorům může signál výrazně změnit směr příchodu, a tím zhoršit přesnost určování polohy. [10]–[12], [14]

Laterace a angulace

Ze znalosti úhlů lze prostřednictvím angulačních technik určit neznámou polohu vysíacího zařízení. Angulační odhad je tedy trigonometrický přístup, který se používá k určení neznámé polohy lokalizačního zařízení na základě znalosti dvou úhlů a vzdálenosti mezi nimi. K odhadu polohy ve 2D stačí znát vzájemnou polohu (vzdálenost) pouze dvou přijímačů a úhly, které svírají s příchozím paprskem signálu z vysílače. Pro zvýšení přesnosti se k odhadu polohy používají tři nebo více přijímačů (triangulace, multiangulace, apod.). [7], [10], [11], [15]

K nalezení neznámé polohy vysílače ze známých informací o vzdálenosti mezi přijímačem a vysílačem se naopak používají laterační techniky. Při lateraci lze vzdálenosti mezi přijímačemi a vysílačem považovat za poloměry kružnic se středy v každém přijímacím bodě. Neznámá poloha vysílače je tedy dána průsečíkem všech takto vzniklých kružnic. Pokud pro výpočet polohy byly použity tři přijímací zařízení hovoří se o trilateraci. V případě více takovýchto bodů o multilateraci. [7], [10], [11], [13], [15]

4.1.2 Wi-Fi

Wi-Fi (Wireless Fidelity) označuje místní bezdrátovou síť, která ke komunikaci využívá rádiové vlny o frekvenci 2,4 GHz nebo 5 GHz. Význam Wi-Fi (hovoří se zejména o frekvenci 2,4 GHz) jako klíčové technologie pro lokalizační aplikace je z velké části dán stávající infrastrukturou ve vnitřních prostorách. Pro účely sledování polohy objektů pomocí Wi-Fi je možné využít existující infrastruktury a přístupových Wi-Fi bodů, které jsou přítomny ve většině budov. Nicméně rozvržení přístupových bodů je ve většině případů optimalizováno pro účely datové komunikace, proto pro dosažení lepších výsledků lokalizace je častokrát nutné infrastrukturu posílit (tj. přidat přístupové body). [7], [10], [16], [17]

Dosahovaná přesnost při použití Wi-Fi lokalizace není nikterak velká. Z velké části je to způsobeno použitým algoritmem pro určení polohy. Nejběžnější a nejrozšířenější lokalizační technika používaná pro určování polohy pomocí Wi-Fi je založena na RSSI, která následně slouží jako vstup pro metodu "fingerprinting". Nicméně menší výsledná přesnost je způsobena i tím, že technologie pracuje v bezlicenčním ISM (Industrial, Scientific and Medical - bezlicenční pásmo určené pro průmyslové, vědecké a zdravotnické použití) pásmu 2,4 GHz. Toto frekvenční pásmo využívá i mnoho dalších technologií nebo spotřebitelských produktů (Bluetooth, mikrovlnné trouby, alarmy apod.), čímž dochází k zahlcení pásmu a omezení dostupnosti kanálu. Dosahovaná přesnost je přibližně 20 metrů za použití infrastruktury optimalizované pro datovou komunikaci. Posílením infrastruktury je možné dosáhnout přesnosti 5 až 8 metrů ve vnitřním prostředí. [7], [16]–[18]

Obrovskou předností Wi-Fi je pokrytí 50 až 100 m a možnost přenášet velké množství informací, přičemž rychlosť může dosahovat až několika gigabitů za sekundu. Nicméně v souvislosti s lokalizačními systémy není využit potenciál takto velkých rychlostí přenosu. Zmíněný vysokorychlostní přenos dat je jedním z důsledků vyšší energetické náročnosti technologie. To má za následek poměrně nízkou životnost baterie Wi-Fi tagu, což je z uživatelského hlediska nevýhodné a může to být limitem tohoto řešení. [7], [17]

4.1.3 Bluetooth Low Energy

BLE (Bluetooth Low Energy — nízko-výkonové Bluetooth) je bezdrátová komunikační technologie pro komunikaci na krátkou vzdálenost s vylepšenými nízkonákladovými a nízkoenergetickými vlastnostmi vhodná pro určování polohy objektů. Tato technologie, stejně jako Wi-Fi, operuje v bezlicenčním ISM pásmu a potýká se tedy se stejnými problémy, které plynou z podstaty fungování na této frekvenci (zahlcení pánsma, omezená dostupnost kanálu apod.). [18], [19]

Prvotní verze BLE využívaly k určení polohy techniky založené na metodě RSSI. Nicméně nové verze BLE umožňují kromě metody RSSI využívat i metodu AoA, což umožňuje zjistit polohu objektu s mnohem vyšší přesností. Další výhodnou vlastností BLE je použití funkce AFH (Adaptive Frequency Hopping - adaptivní frekvenční přeskoky). Prostřednictvím této funkcionality se zařízením snaží dynamicky vyhýbat kolizím a rušením s jinými zařízeními a signály v ISM pásmu. Díky témtu benefitům je možné pomocí BLE lokalizovat s přesností až 1 m. [7], [10], [13], [14], [20]

Energetická náročnost u Bluetooth Low Energy je takřka minimální. Lokalizační zařízení je po většinu doby udržováno v tzv. spánkovém režimu (je neaktivní) a do aktivní fáze se dostane jen tehdy, je-li iniciována jeho komunikace. Aktivní komunikace přitom trvá jen několik milisekund. V tom důsledku životnost lokalizačního zařízení na jednu výměnu baterie může být i několik let (3 až 15 let v závislosti na frekvenci komunikace). [14], [21]

Cenou za dosažení malé spotřeby je to, že prostřednictvím Bluetooth Low Energy je možné přenášet jen malé objemy dat. Teoreticky 1 Mb/s, ale v praxi jsou přenosové rychlosti ještě nižší, do 100 kb/s. Výsledná latence se pohybuje v řádech jednotek sekund (2 až 5 s). Dosah technologie, v porovnání s Wi-Fi, je o něco menší a činí zhruba 30 m. [13]–[15], [18], [19]

4.1.4 RFID

RFID (Radio Frequency Identification - radio-frekvenční identifikace) je další technologie sloužící pro určování polohy, která využívá rádiové vlny k přenosu dat. Technologie RFID využívá několika různých frekvencí pro přenos dat a také má různé varianty tagů.

Od volby vlnové frekvence a typu lokalizačního zařízení se následně odvíjí výsledný komunikační dosah technologie. Pro přenos dat je využívána nízká frekvence (od 123 – 134 kHz), vysoká frekvence (13,56 MHz) a nakonec ultra-vysoká frekvence (860 – 960 MHz). [14], [22]

Podle toho, zdá má tag vlastní zdroj napájení, se dělí na pasivní a aktivní. Přítomnost zdroje napájení ovlivňuje velikost, cenu a rozsah čtení tagu. Pasivní tagy (zavedeným výrazem je štítek) nemají žádný interní zdroj napájení. Potřebnou energii pro přenos dat čerpají ze signálu vysílače (čtečky). V tom důsledku mají mnohem menší dosah než napájené alternativy a vysílají pouze v přítomnosti signálu čtečky. Na druhou stranu se jedná o malá, levná, odolná a téměř bezúdržbová zařízení s neomezenou životností. Aktivní tagy mají místní zdroj energie (např. baterii) a vysílají vlastní signál. Ve srovnání s pasivními štítky mají výrazně větší dosah a kapacitu paměti, ale také větší velikost a cenu. Životnost baterie této varianty tagu může být několik let (3 - 5 let). [23]–[25]

V případě použití pasivních RFID štítků nelze určit přesnou polohu sledovaného objektu. K dispozici je pouze informace o tom, že sledovaný objekt (štítek) se v určitém čase vyskytoval v dosahu konkrétní čtečky, přičemž čtecí vzdálenost je poměrně omezená, zhruba metr. Pokud štítek nezachytilo žádné jiné čtecí zařízení, předpokládá se, že objekt dosud nezměnil svou polohu. Odhadovaná poloha sledovaného objektu tedy vychází ze znalosti, která čtečka, jejíž poloha je přesně známa, zaznamenala jako poslední daný štítek, tj. sledovaný objekt. [8], [23], [26]

Pokud se hovoří o lokalizaci v reálném čase pomocí technologie RFID většinou se využívá pro přenos dat ultra-vysoké frekvence v kombinaci s aktivními tagy, neboť tak lze dosáhnout pokrytí technologie až 100 m. Dosahovaná přesnost se pohybuje kolem tří metrů, neboť se často využívá techniky RSSI. Latence technologie je v rozmezí 3 - 5 sekund. [8], [22], [24], [27]

Obrovským problémem této technologie je vliv vícecestného efektu, ke kterému dochází, když se rádiové signály z RFID tagů (štítků) a čteček (přijímačů) odrážejí, ohýbají nebo se vzájemně ruší kvůli přítomnosti překážek (stěny, stropy apod.). Dalšími komplikacemi jsou velké stroje, kovové nebo železné předměty či konkurenční frekvence. Další limitací je samotné připevnění tagu na kovové předměty. V takovém případě musí být využito tagů se speciálním podkladem, které jsou určeny k aplikaci na kov. [22], [25], [28]

4.1.5 UWB

Stejně jako Bluetooth a Wi-Fi je i UWB (Ultra-Wide Band — ultra-široká technologie) bezdrátový komunikační protokol, který využívá rádiové vlny. Frekvenční rozsah technologie UWB je mezi 3,1 a 10,6 GHz. Vyhne se tak zmíněnému ISM pásmu 2,4 GHz a problémům s ním spojených. Princip fungování technologie spočívá ve vysílání extrémně

krátkých impulsů v širokém frekvenčním pásmu (500 MHz) s velmi nízkou výkonovou spektrální hustotou. [10], [17], [29]

Velká šířka pásma a extrémně krátké průběhy impulsů snižují vliv vícecestného rušení (odrazy), rušení od jiných komunikačních zařízení, a dokonce i vliv vnějšího šumu. Vysoká frekvence pulzů (1 pulz každou nanosekundu) navíc umožňuje signálům účinně procházet běžnými objekty, jako jsou stěny, nábytek a jiné předměty. [17], [29], [30]

Na rozdíl od ostatních technologií se určování polohy u UWB technologie provádí pomocí metodiky ToF, namísto RSSI. Všechny tyto vlastnosti významně zvyšují přesnost určování polohy za pomoci UWB, která se ve výsledku pohybuje okolo 10 cm. [7], [10], [17]

Díky vysílání miliardy pulzů za sekundu (požadavek na určení polohy až 100krát za sekundu) má UWB velmi nízkou latenci, v jednotkách milisekund. Životnost baterie tagu je velmi ovlivněna frekvencí odesílání požadavku na určení polohy. V tom důsledku se životnost pohybuje v rozmezí měsíců, roků až několik let (i 10 let). Díky poměrně velké přenosové rychlosti (z hlediska IPS) lze přenášet větší objem dat, přenosová rychlosť odpovídá 7 až 27 Mb/s. Dosah je o něco menší v porovnání například s technologií Wi-Fi, zhruba 50 m. Nicméně tuto nevýhodu lze eliminovat hustejší infrastrukturou, samozřejmě za předpokladu vyšších nákladů. [17], [19], [30]–[32]

Kapitola 5

Výběr technologie

Klíčovým rozhodovacím parametrem při výběru technologie byla zmíněná přesnost. Nicméně technologie byly v této práci hodnoceny i na základě dalších kritérií, která jsou taktéž velmi důležitá a utváří tak celkový vhled do fungování jednotlivých technologií.

Těmito dalšími parametry jsou dosah (pokrytí), energetická náročnost a latence. Ačkoliv dalším stěžejním aspektem je rozhodně cena, v rámci porovnání technologií nebude uvažována. Důvodem proč nebude tento aspekt zohledněn je, že nelze obecně stanovit finanční náročnost vybraného řešení, neboť je to problém podléhající komplexní analýze zadání.

I celkovou nákladovost hardware části projektu lze určit jen rámcově. Ačkoliv lze stanovit přesnou jednotkovou cenu HW (Hardware) vybavení, výsledná cena se odvíjí od počtu pořízených zařízení. Zatímco množství potřebných lokalizačních vysílačů je ve všech případných řešeních stejně a porovnání ceny nečiní problém, komplikace nastávají u počtu kotev. Počet potřebných kotev se liší u každé technologie, což je dáno různým dosahem technologií, a proto může být finanční hledisko zavádějící.

Pro přehlednost a lepší orientaci byly všechny technologie a jejich důležité vlastnosti zaneseny do společné tabulky 5.1.

Tabulka 5.1: Porovnání zkoumaných technologií

TECHNOLOGIE	PŘESNOST	DOSAH	TECHNIKA	SPOTŘEBA BATERIE TRANSPONDÉRŮ	LATENCE
WI-FI	v rozsahu 10 - 20 m	až 100 m	RSSI	Vysoká	300 ms
BLE	okolo 1 m	okolo 30 m	RSSI, AoA	Nízká	2 - 5 s
RFID	okolo 3 m	až 100 m	RSSI	Nízká	3 - 5 s
UWB	okolo 10 cm	okolo 50 m	ToF, TDoA, AoA	Nízká	100 ms

Na základě kapitoly 4, kde byly definovány parametry zkoumaných technologií, byla vybrána technologie UWB. Tato technologie, ze všech popsaných, poskytuje nejlepší teoretické vlastnosti.

Dostupná literatura uvádí u této technologie přesnost okolo 10 cm, tedy nejvyšší přesnost ze všech zkoumaných technologií. To je z velké části způsobeno přesnou metodou určování polohy UWB na základě vzdálenosti prostřednictvím ToF, namísto metody RSSI. Ale jsou i další vlastnosti, kterými technologie UWB disponuje, a díky kterým byla shledána jako nejvhodnější.

UWB používá pro přenos dat frekvence od 3,1 do 10,6 GHz. Má tedy teoreticky menší náchylnost k interferenci s ostatními zařízeními, která jsou na stejné frekvenci. Rovněž se tak vyhne i ISM pásmu 2,4 GHz, které má obecně špatné vlastnosti šíření signálu (signály mohou být snadno odraženy nebo pohlceny) a je tu také větší riziko interference, neboť toto pásmo využívají i jiné technologie a zařízení (Wi-Fi, Bluetooth, mikrovlnná trouba, audio-vizuální zařízení, apod.). Nejen že technologie UWB je méně náchylná na rušení, ale i ona sama způsobuje velmi malé rušení stávajících úzkopásmových rádiových systémů.

Díky všem výše popsaným vlastnostem byla technologie UWB zvolena jakožto nejvhodnější řešení ze všech zkoumaných možností. Na základě tohoto výhodnocení byly zapojeny hardwarové komponenty založené na modulu UWB. Pomocí těchto komponent byly ověřovány předpokládané teoretické vlastnosti. Potřebné hardwarové vybavení pro účely této práce bylo poskytnuto firmou Sewio.

Kapitola 6

Experiment

Cílem této kapitoly práce je ověřit, zda vybraná technologie dosahuje vlastností, které jsou uváděny v dostupné teoretické literatuře. Experimenty se soustředí zejména na přesnost a odolnost vybrané technologie vůči rušení, jakožto klíčových parametrů při implementaci do reálného provozu.

V následujících kapitolách jsou popsány, zpracovány a vyhodnoceny realizované experimenty, včetně ukázky z funkční zkoušky technologie UWB ve výrobní hale. Experimenty byly provedeny dva a lišily se zejména v charakteru prostředí. První experiment se uskutečnil v laboratoři ČVUT (České Vysoké Učení Technické v Praze). Prostředí laboratoře je z hlediska šíření signálu poměrně příhodné. Nevyskytuje se zde žádné předměty, které by tvořily překážku při šíření signálu, ani žádné jiné výrazné zdroje rušení.

Druhý experiment byl zrealizován v halové laboratoři ČVUT. Tento prostor je z pohledu možného rušení signálu poněkud komplikovanější. Hala obsahuje rozvaděče, frekvenční měniče a motory, které mohou být potencionálními zdroji rušení radiového signálu. Takto popsané prostředí vykazuje podobné rysy, kterým by technologie měla čelit v reálném provozu, a proto je vhodné technologii v takovýchto podmírkách otestovat.

Pro verifikaci získaných výsledků z prvního a druhého experimentu byla rovněž uskutečněna funkční zkouška technologie UWB přímo na hale Škoda Auto. Tato funkční zkouška má ověřit přesnost technologie v reálném provozu.

Kromě potřebného hardwaru, který byl poskytnut firmou Sewio, bylo pro uskutečnění experimentu zapotřebí i vytvoření řady programů. Vytvořené programy sloužily jednak pro zpracování naměřených dat, ale také například pro vytvoření samotného připojení mezi klientským serverem a hardwarem, pro odběr a uložení příchozích dat z tagu, on-line či off-line vykreslení výsledků lokalizace nebo například program pro animaci lokalizačních dat. Všechny programy byly vytvořeny v programovacím jazyku Python a jsou součástí přílohy na CD (Compact disc - Kompaktní disk).

6.1 Realizace experimentů

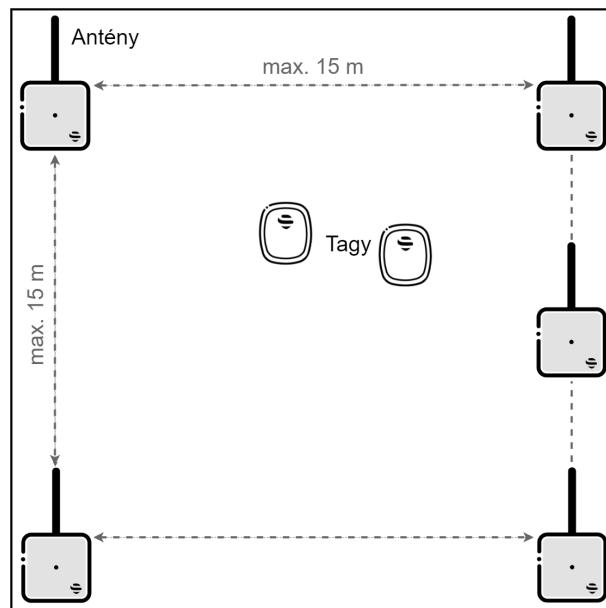
Dosažení maximální přesnosti při lokalizaci je podmíněno řadou faktorů. V následujících podkapitolách jsou uvedena a popsána všechna důležitá hlediska, na jejichž splnění byl v probíhajících experimentech kladen velký důraz. Dodržením těchto pravidel, nebo alespoň úsilí o jejich splnění v největším možném rozsahu, se zvyšuje kvalita výsledné lokalizace (dosažená přesnost).

6.1.1 Rozložení kotev

První krok obou experimentů je rozmístění hardwarových zařízení, zejména vhodné a správné rozložení vysílačů (tzv. kotev). Při instalaci kotev je důležité zajistit, aby anténa kotvy směřovala směrem vzhůru a byla nejméně 30 cm od stropu. Proto při umístění kotev byly použity tripoddy, které byly napájeny přes aktivní PoE (Power over Ethernet) zařízení ze zdroje napájení.

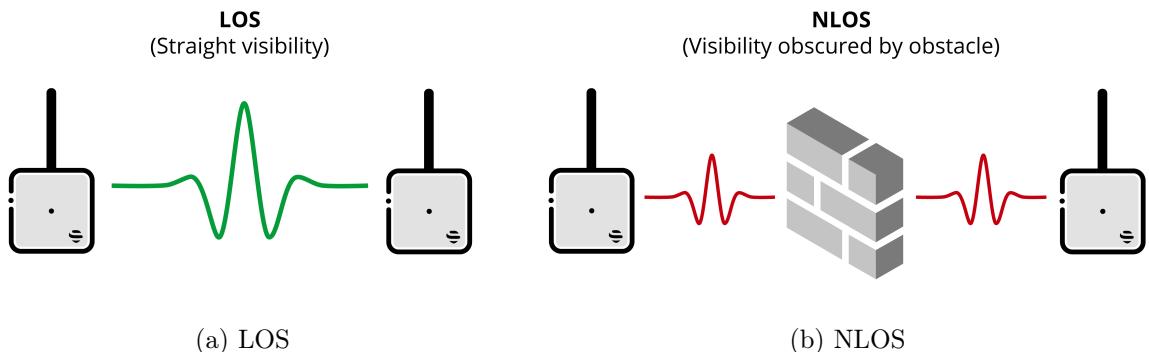
Dalším významným faktorem pro správnou funkci zařízení je umístění kotev ve stejné výšce a do čtvercové nebo obdélníkové geometrie. Při experimentech byly použity kotvy Vista Omni, jejichž maximální vzájemná vzdálenost činí 15 m.

Následující obrázek znázorňuje schéma instalace, které bylo dodržováno při obou experimentech. Kotvy byly rozestavěny v každém rohu ve stejné výšce. Jejich vzájemná vzdálenost nepřesahovala maximální povolený rozestup (15 m). V případě použití pěti kotev byla poloha páté kotvy po obvodu nejdelší strany obrazce.



Obrázek 6.1: Rozvržení antén při instalaci

Kromě vhodného rozložení kotev je další nezbytnou podmínkou, pro dosažení nejlepších výsledků, dodržení přímé viditelnosti mezi přijímačem a vysílačem tzv. LOS (Line of Sight - přímá viditelnost). Případná překážka mezi zařízení ztěžuje průchod rádiového signálu tzv. NLOS (Non-line of Sight - Nepřímá viditelnost).



Obrázek 6.2: Ukázka přímé (LOS) a nepřímé (NLOS) viditelnosti mezi vysílači [33]

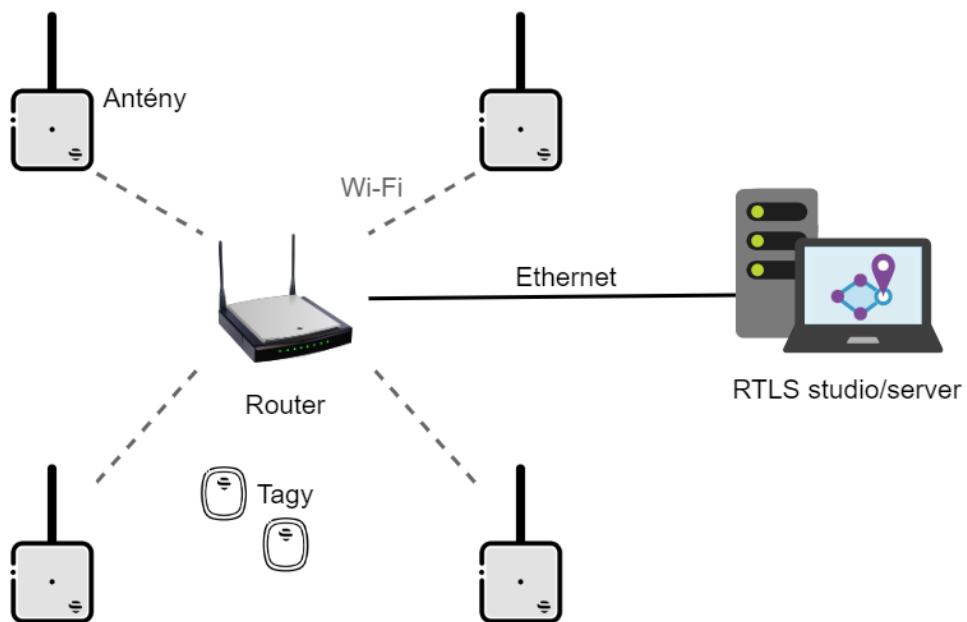
Přímá viditelnost musí být respektována zejména mezi hlavní (tzv. master) kotvou¹ a ostatními kotvami. Tag musí být vždy viditelný nejméně čtyřem kotvám, aby mohla být vypočítána přesná poloha sledovaného objektu.

6.1.2 Připojení na síť

Po správné instalaci kitu byl zahájen další krok, a to navázání spojení mezi vysílači a přístupovým bodem (tj. připojení vysílačů na síť.). Připojení kotev na síť se uskutečnilo prostřednictvím bezdrátového Wi-Fi routeru. Pro bezchybné fungování musí být síť Wi-Fi vyhrazena pouze RTLS systému a zároveň musí být nastavena TCP (Transmission Control Protocol) synchronizace. V tomto kroku byla rovněž provedena konfigurace routeru pro RTLS vybavení.

Na obrázku 6.3 je schéma popsané topologie. Antény jsou umístěny ve čtvercové geometrii a skrze síť Wi-Fi bezdrátově připojeny k přístupovému bodu - routeru. Odtud je router Ethernetem připojen k počítači, na kterém je k dispozici RTLS studio.

¹Význam pojmu hlavní (master) kotva je vysvětlen na straně 24 v kapitole 6.1.3 Inicializace a synchronizace.



Obrázek 6.3: Topologie

RTLS studio je software, který umožňuje spravovat a řídit lokalizační systém. Ovládání probíhá pomocí GUI (Graphic User Interface - Grafické uživatelské rozhraní) dostupného ve virtuálním prostředí aplikace VirtualBox. Vzhledem k nutnosti uložení lokalizačních dat pro jejich další analýzu bylo RTLS studio využito pouze ke konfiguraci, inicializaci a synchronizaci všech zařízení. Vše ostatní bylo realizováno vytvořenými programy.

6.1.3 Inicializace a synchronizace

Po instalaci kotev je nezbytné ověřit správnost jejich rozmístění. K tomuto účelu se využívá procesu synchronizace, který je dostupný na zmíněném RTLS studiu. Synchronizace ověří, zda je aktuální rozmístění vysílačů vhodné a lze tak lokalizační systém spolehlivě používat.

Před samotným zahájením synchronizace je nezbytné provést inicializaci. Během inicializace dochází k měření kvality a síly signálu mezi jednotlivými anténami. Měření slouží k identifikaci hlavní (tzv. master) antény.² Ta je následně použita k rozesílání konfigurace do ostatních zařízení.

Obě tyto funkce jsou k dispozici v RTLS studiu prostřednictvím manažera, který zprostředkovává správu HW zařízení. Tento manažer umožňuje vyhledávat tagy a kotvy, zobrazovat o nich dostupné informace a upravovat jejich parametry. Díky této funkcionality je možné zařízení nakonfigurovat.

²Master anténa je taková anténa, které v průběhu měření dosahovala nejlepších výsledků.

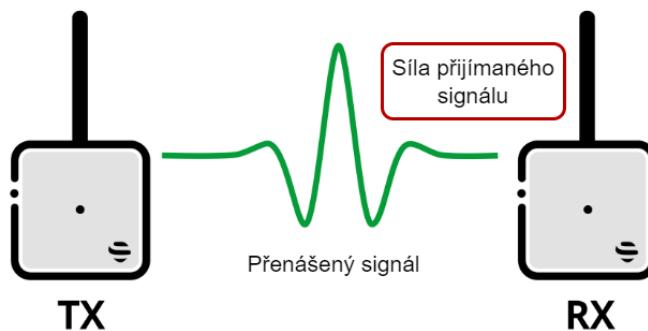
V okamžiku, kdy je nastavena hlavní kotva, lze zahájit synchronizaci a zhodnotit tak správnost instalace vysílačů. Správná instalace se hodnotí na základě 3 parametrů:

a) SD (Second Difference)

Parametr SD udává stabilitu synchronizace. Vypočítává se z po sobě jdoucích synchronizačních časových značek odeslaných z hlavní kotvy do kotev sousedních, které značky přijímají. Při dobré synchronizaci nabývá tento parametr hodnoty 1. Hodnoty větší než 2 indikují nepřesnou synchronizaci. Pomocí parametru SD lze detektovat i případné ztráty příchozích/odchozích paketů. [34]

b) RSSI

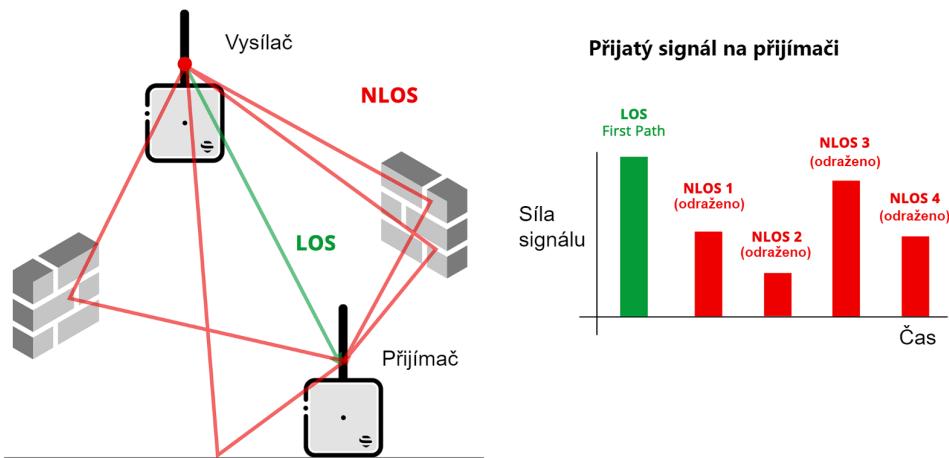
RSSI je měření výkonu přijímaného rádiového signálu. Tato proměnná se vztahuje k síle signálu z hlavního vysílače do přijímacího zařízení a vyjadřuje se v záporných hodnotách. Čím vyšší hodnoty nabývá tento parametr, tím je signál kvalitnější. Hodnoty -90 dBm a vyšší obvykle znamenají, že se vysílače nachází v oblasti s vynikajícím pokrytím. Čím více se hodnota RSSI blíží k hodnotě -80 dBm, tím je signál silnější. [35]



Obrázek 6.4: Parametr RSSI [35]

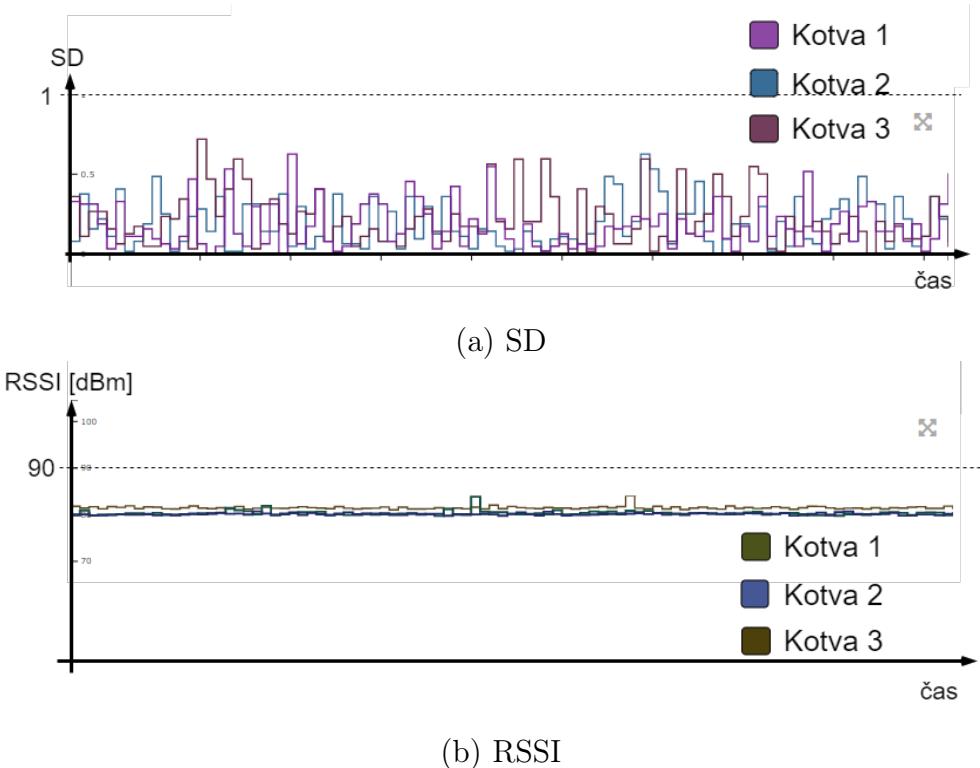
c) FP (First path)

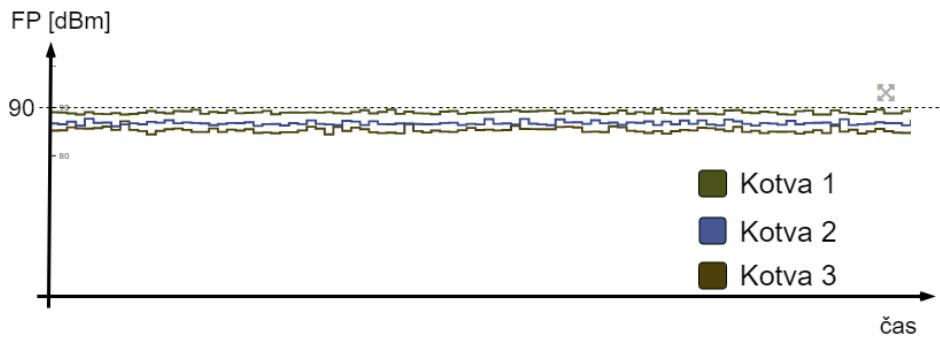
Parametr FP označuje kvalitu přímo přijímaného signálu. Je velmi podobný parametru RSSI, ale je mnohem citlivější na odražené signály. Hodnota -80 dBm je nejlepší hodnota, které lze nabýt. V praxi jí však nikdy není dosaženo, neboť s rostoucí vzdáleností se hodnota snižuje. Hodnoty nižší než -115 dBm jsou z hlediska kvality lokalizace nevhodující. [36]



Obrázek 6.5: Parametr FP [36]

Pro správnou synchronizaci je nezbytné, aby se všechny 3 parametry pohybovaly v definovaných mezích. Synchronizace probíhá v reálném čase, a proto je možné sledovat vývoj jednotlivých parametrů v on-line grafech. Osa X v každém grafu reprezentuje čas. Na ose Y jsou potom vyneseny parametry SD, RSSI a FP. Pro dosažení nejlepších výsledků by výsledné grafy všech parametrů měly vypadat podobně jako na obrázku 6.6. Na něm je vidět, že všechny křivky parametrů (a), (b), (c) jsou ve stanovených limitech. Takto vypadající grafy parametrů jsou známkou správné inicializace, která vypovídá o vhodném umístění kotev.

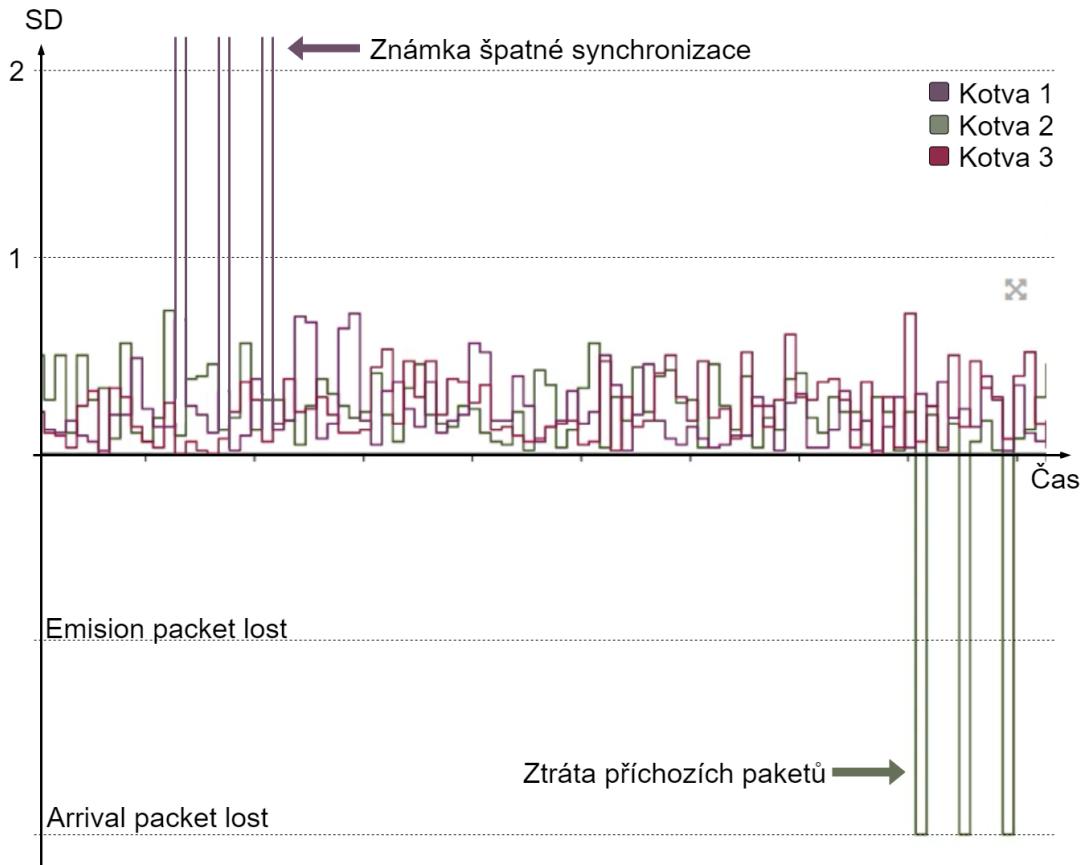




(c) FP

Obrázek 6.6: Ukázka správné synchronizace kotev pomocí ukazatelů SD, FP a RSSI

Na obrázku 6.7 je naopak ukázán příklad špatné synchronizace. Fialové křivky nad hodnotou dva jsou ukazatelem nevhodné synchronizace. Zelené křivky v obrázku, které klesají pod osu X, navíc značí ztrátu příchozích paketů. V takovémto případě je nutné podniknout opatření, která eliminují tyto výsledky synchronizace. Zlepšení výsledků může být dosaženo změnou rozmístění vysílačů a zajištění lepší vzájemné viditelnosti (zejména viditelnosti mezi hlavní a ostatními kotvami). Další možností je kompenzace v ose Z. Touto kompenzací se rozumí nastavení vzdálenosti mezi zemí a tagem (tj. v jaké vzdálenosti od země se tag pohybuje). Cílem těchto opatření je dosáhnout lepší synchronizace, ideálně takové synchronizace, která je ukázána na obrázku 6.6.



Obrázek 6.7: Ukázka špatné synchronizace skrze parametr SD

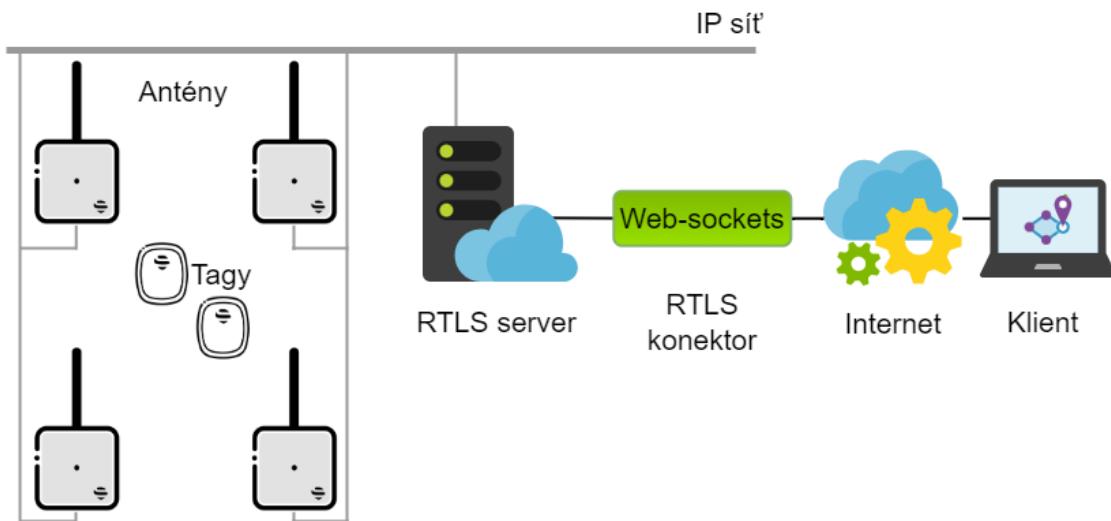
Při všech realizovaných praktických testech bylo postupováno tak, aby všechny do posud zmíněné náležitosti byly splněny v největším možném rozsahu. Náležité provedení všech kroků, popsaných v kapitole 6.1, v sobě odráží kvalitu výsledné lokalizace, která jde v souladu s vyšší dosahovanou přesností při prováděných experimentech. Kapitoly popisující konkrétní experimenty proto neřeší výše popsané parametry, ale venují se pouze dosaženým výsledkům.

6.1.4 Přenos dat

Po dokončení všech výše uvedených kroků následovala samotná lokalizace a získání aktuálních polohových dat z tagu. Základem určení aktuální polohy tagu (tj. souřadnic X a Y) je RTLS server. Ten vypočítá polohu tagu na základě přijatých signálů z tagu a znalosti polohy kotev. Po výpočtu server odešle novou polohu spolu s dalšími informacemi (např. čas, úroveň nabité baterie apod.) přes WebSockets konektor. Tento konektor využívá TCP spojení, čímž je zajištěna spolehlivost odběru dat, která jsou přenášena ve formátu JSON (JavaScript Object Notation - JavaScriptový objektový zápis). Komunikace mezi serverem a klientem (příjemce dat) probíhá v reálném čase na základě modelu publish - subscribe. To umožňuje připojení jakéhokoliv klienta (tzv. subscriber) k odběru

streamu z tagu a získání okamžitých informací o změně polohy.

Schéma zapojení je zobrazeno na obrázku 6.8. Aktuální poloha tagu je vypočítána v RTLS serveru a s využitím konektoru WebSockets a internetu jsou data dostupná klientovi.



Obrázek 6.8: Schéma zapojení

Pro odebírání dat z tagu byl použit zmíněný WebSockets konektor. K tomuto účelu byl vytvořen program, který navázal spojení s tagem a umožnil tak ukládat příchozí data. Součástí tohoto programu je také on-line vykreslování pozice tagu do půdorysu laboratoře. Způsob, jakým je v programu Python vytvořeno spojení, je zobrazeno dále.

```
class myClassB(Thread):
    def __init__(self):
        Thread.__init__(self)

        self.get_tag_posX = 0.0
        self.get_tag_posY = 0.0

        self.upload_time = datetime.now() + timedelta(minutes=30)

        self.get_tag_datastreamsX = []
        self.get_tag_datastreamsY = []

    # Kód pokračuje na další stránce
```

Pokračování kódu

```
self.ws = create_connection('ws://192.168.225.2')
self.ws.send('{"headers": {"X-ApiKey": "171555a8fe71148a165"}, 
"method": "subscribe", "resource": "/feeds/24"}')
self.start()
```

Kód 6.1: Vytvoření spojení

6.1.5 Lokalizační tag použitý při experimentech

Tag, který byl použit při experimentech, má v sobě zabudován akcelerometr. Za pomoci akcelerometru je detován pohyb lokalizačního zařízení. Z informací ze senzoru má tak tag možnost přejít do spánkového režimu, jakmile se nepohybuje. Podstatou režimu spánku je automatická změna (resp. prodloužení) obnovovacího intervalu. Intervalem obnovení se rozumí perioda vysílání tzv. blinku³. V případě pohybujícího se tagu je tento interval typicky 300 - 2000 ms. Interval obnovení v režimu spánku je podstatně delší, v řádech minut. Využití funkce režimu spánku nejen výrazně prodlužuje životnost baterie, ale také snižuje zatížení komunikačního kanálu.

Pro statický (nepohybující se) tag mohou být definovány 3 typy režimů spánků:

a) Režim spánku zakázán

Režim spánku je deaktivován. Tag tedy pravidelně odesílá blink i v případě, že není detekován žádný pohyb.

b) Režim spánku povolen - okamžité uspání

Tag se přepne do režimu spánku ihned poté, co není detekován žádný pohyb.

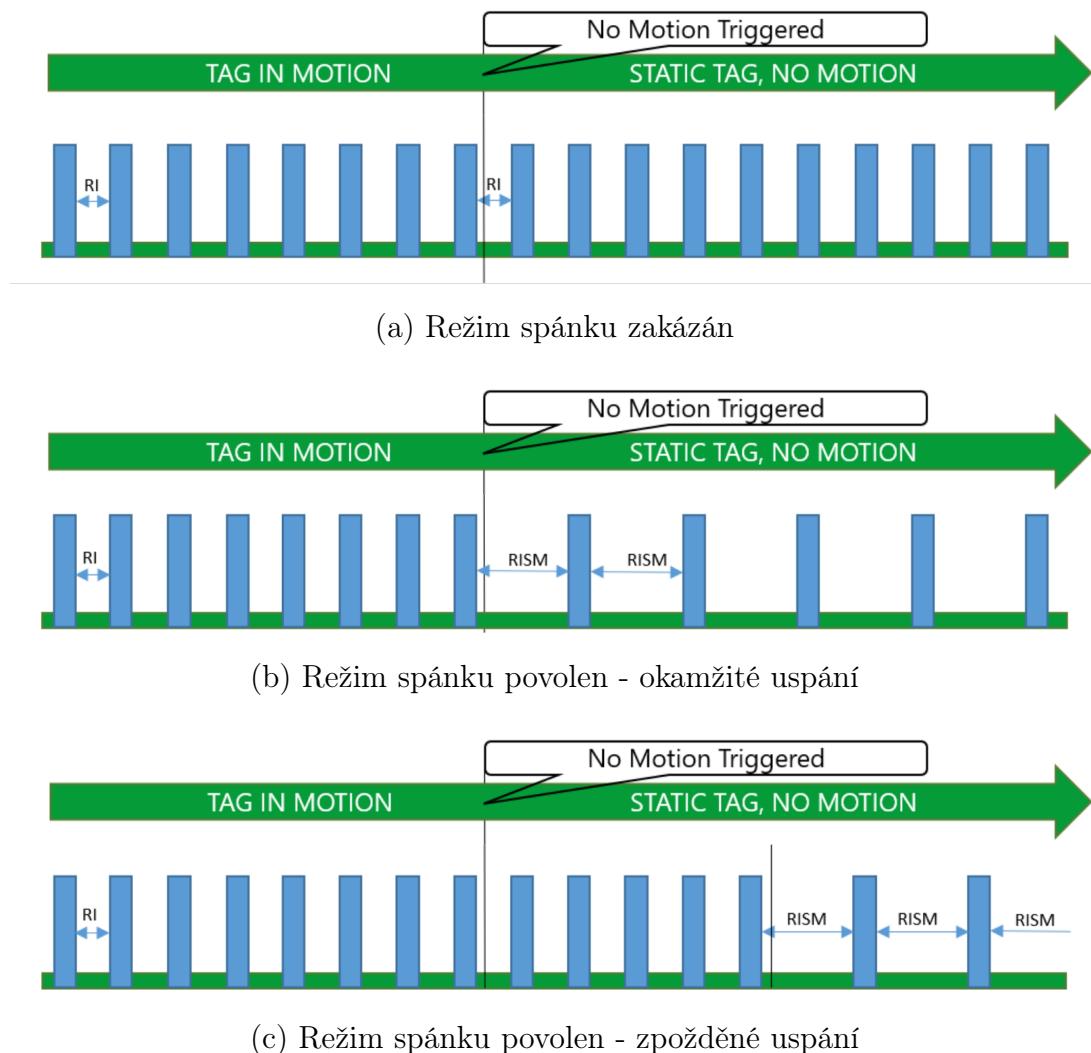
c) Režim spánku povolen - zpožděné uspání

Jakmile není detekován žádný pohyb, tag zůstane vysílat po dobu 15 sekund a poté přejde do režimu spánku.

Při obnovovacím intervalu každých 100 ms je výsledná životnost baterie 3 - 4 měsíce, při intervalu 1 s téměř 3 roky a při obnovovací frekvenci každých 10 s může tag na jedno nabítí vydržet až 15 let. [32]

³Blink označuje diskrétní přenos polohového signálu.

Na obrázku 6.9 jsou graficky znázorněny jednotlivé režimy spánku. Modré sloupce znázorňují blinky. Doba mezi jednotlivými blinky je interval obnovení (na obrázku zakresleno jako RI). Interval obnovení při přechodu do režimu spánku je na obrázku vyznačen jako RISM. Lze si všimnout, že RISM je výrazně delší než RI.



Obrázek 6.9: Režimy spánku [37]

Při všech experimentech byl režim spánku zakázán, tj. případ 6.9 (a). Z tagu bylo proto možné po celou dobu měření odebírat a ukládat lokalizační data potřebná k vyhodnocení. Obnovovací interval byl nastaven na 200 ms.

6.1.6 Zaměření referenční hodnoty

Při zaměřování referenční polohy tagu byl použit laserový dálkoměr BOSCH PLR 50 s produktovým číslem 3 603 K16 300. Datasheet tohoto dálkoměru udává přesnost měření $\pm 2\text{mm}$ s odchylkou $\pm 0,05\text{mm/m}$.

Každá naměřená referenční hodnota, a tudíž i následně vypočtená vzdálenost od referenční hodnoty k hodnotě lokalizované, je zatížena touto chybou měření. Nicméně cílem této práce je lokalizovat s přesností na 30 cm, a tudíž tato chyba měření nijak výrazně neovlivní získané výsledky.

6.2 Obecný popis experimentů

Pro ověření schopnosti technologie lokalizovat s přesností na 30 cm v průmyslovém prostředí byl sestaven a realizován jednak konkrétní druh experimentu, tak i způsoby, jak naměřená data vhodně analyzovat a vyhodnotit.

Během experimentu bylo lokalizační zařízení ponecháno v nehybném stavu po konstantní časový úsek. Na základě kapitoly 6.1.5 byl režim spánku zakázán. Po celou dobu, kdy se tag fyzicky nacházel ve statické poloze, z něho byla odebírána a ukládána příchozí data, viz kód 6.8. Po skončení experimentu byl tag přemístěn na jinou náhodně vybranou pozici a měření bylo zopakováno. Všechna nasbíraná data byla uložena k dalšímu zpracování.

Přestože se lokalizační zařízení po celou dobu měření nacházelo v neměnné, fixní poloze, příchozí data detekovala náhodné kolísavé změny měřené polohy. Po uložení polohových dat tak vznikla množina bodů, která ale reprezentuje jednu změrenou polohu tagu. Cílem vyhodnocovací části je vhodné zpracování naměřené množiny bodů a interpretace získaných výsledků.

6.3 Způsob zpracování a vyhodnocení dat

Příchozí data byla předávána ve formátu JSON a informace o souřadnici X a Y byly ukládány do dvou samostatných souborů také ve zmíněném JSON formátu. Data obsahovala základní informace o tagu jako jeho ID, aktuální souřadnici nebo čas. Kromě těchto informací se v pravidelných intervalech přenášely údaje o aktuálním stavu baterie a verzi firmware. Struktura (vzhled) příchozích dat je zobrazena níže. Kód 6.2 ukazuje strukturu dat, která přenášela polohové informace. Naopak kód 6.3 znázorňuje data udávající informace o samotném vysílacím zařízení.

```
{"body": {"id": "18", "datastreams": [{"id": "posX", "current_value": " 6.34", "at": "2016-10-18 14:16:56.365"}, {"id": "posY", "current_value": " 2.27", "at": "2016-10-18 14:16:56.365"}, {"id": "clr", "current_value": " 0.10", "at": "2016-10-18 14:16:56.365"}]}, "resource": "\/feeds\/18"}
```

Kód 6.2: Struktura příchozích dat 1

```
{"body": {"id": "1", "datastreams": [{"id": "battery_level", "current_value": "77%", "at": "2016-10-18 15:27:38.606"}, {"id": "firmware_version", "current_value": "3.115", "at": "2016-10-18 15:27:38.606"}]}, "resource": "\/feeds\/1"}
```

Kód 6.3: Struktura příchozích dat 2

Po uložení všech příchozích dat bylo provedeno jejich zpracování. Z těchto dat byly nejdříve extrahovány pouze užitečné informace (viz kód 6.2) a všechny ostatní údaje (viz kód 6.3) byly vymazány.

Následovalo uložení načtených souborů a rozdělení informací z nich do tří samostatných polí - jedno pole pro hodnoty souřadnice X, druhé pro hodnoty souřadnice Y a třetí pro čas. Výsledná pole měla stejnou velikost a obsahovala tisíce záznamů. Nicméně naměřené body v souboru se opakovaly, a proto byla provedena redukce dat a zavedeno nové pole. Toto nové pole s názvem Z obsahovalo počet výskytů tagu na konkrétních souřadnicích (bodě). Po redukci opakujících se bodů vznikly dvě nová pole se souřadnicemi X a Y čítající stovky bodů. Počet unikátních bodů se odvíjí od konkrétního měření.

Takto získaná pole souřadnic byla zpracována různými metodami, prostřednictvím 3D grafu, 2D metod nebo statistických ukazatelů. Metodika analýzy dat navrženými algoritmy je popsána v dalších kapitolách.

V rámci zpracování dat byl také sestaven program pro vykreslování lokalizačních dat, v off-line i on-line režimu. Část kódu, která vykresluje upravená a uložená data je ukázána v kódu 6.4.

```

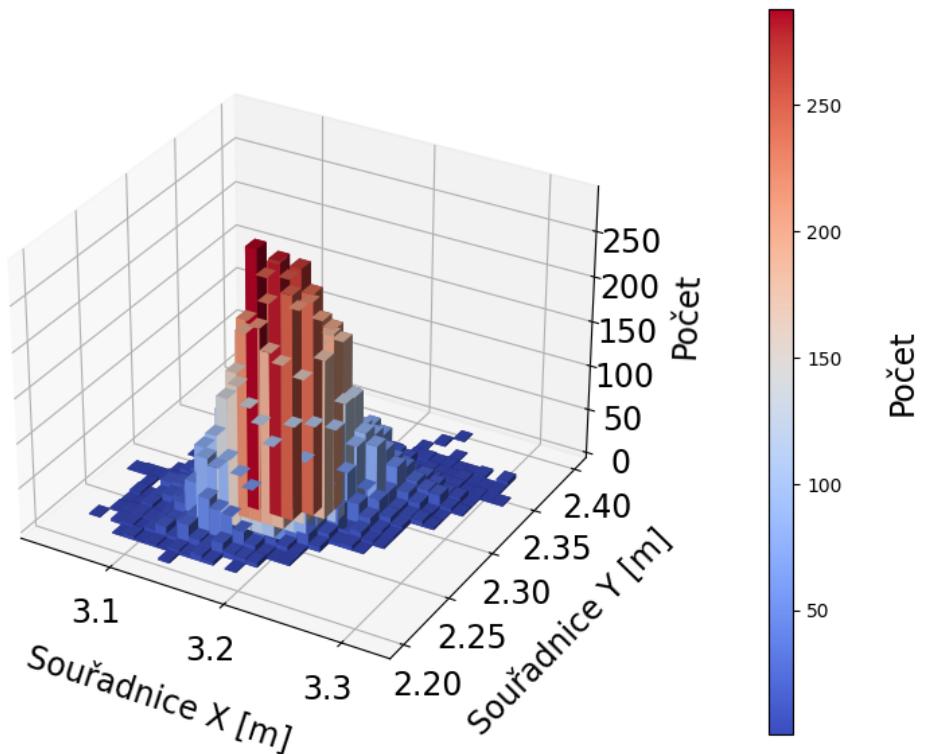
for k~in range(len):
    print(curr_val_X[k] , curr_val_Y[k] , delta_sec[k] , time[k])
try:
    point1.set_xdata(float(curr_val_X[k]))
    point1.set_ydata(float(curr_val_Y[k]))
    fig.canvas.draw()
    fig.canvas.flush_events()
    sleep(delta_sec[k])
except:
    print("Chyba")

```

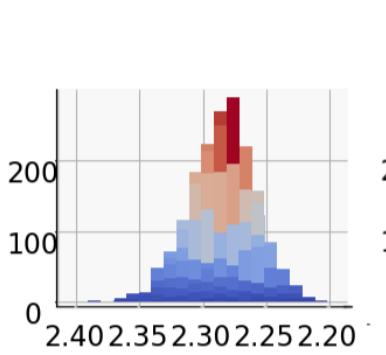
Kód 6.4: Off-line vykreslení výsledků lokalizace

6.3.1 Vykreslení do 3D grafu

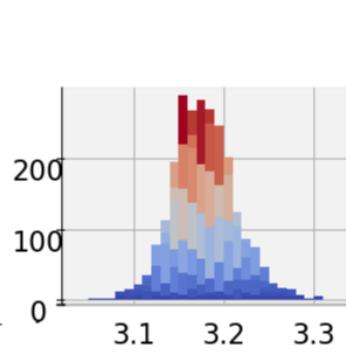
Naměřená data jsou s využitím tohoto algoritmu vykreslena do 3D grafu. Osa X a Y v kartézském souřadnicovém systému zastupuje postupně souřadnice X a Y. Doplňková osa Z reprezentuje množství výskytu stejné souřadnice (tj. kolikrát naměřený bod dosáhl stejných souřadnic). Takto vytvořený 3D graf je zobrazen na obrázku níže. Jednotlivé sloupce reprezentují konkrétní bod, který je charakterizován souřadnicí X a Y. Výška sloupce je dána počtem výskytu tagu v tomto bodě. Sloupce jsou barevně škálovány a jejich barva odpovídá hodnotě na ose Z. Nejmenší hodnotu (tj. tag se na tomto bodě téměř nevyskytoval) reprezentuje modrá barva. Barva červená naopak signalizuje nejvyšší hodnotu, tj. tag se na tomto bodě vyskytoval nejvíce. Celá barevná škála je po pravé straně obrázku. V obrázku jsou rovněž znázorněny pohledy do rovin YZ, XZ a XY. Tyto náhledy jsou také barevně rozlišeny.



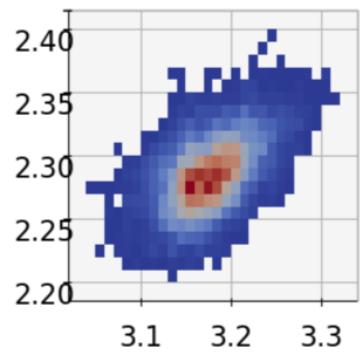
(a) 3D pohled



(b) Pohled směrem osou X



(c) Pohled směrem osou Y



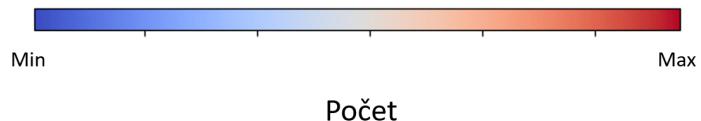
(d) Pohled směrem osou Z

Obrázek 6.10: Vyhodnocení - 3D graf

Tento algoritmus byl použit pro vyhodnocení naměřených dat z důvodu opakujících se bodů v průběhu měření. Souřadnice bodu, který se v průběhu měření opakoval nejčastěji, byly zaznamenány a použity k dalšímu zpracování (je vysvětleno v kapitole 6.3.4).

Součástí tohoto grafického vyhodnocení je i vytvořená vizualizace, která znázorňuje růst jednotlivých sloupců v čase. Animace byla vytvořena v jazyku Python s využitím knihovny Matplotlib a modulu Animation.

Následující algoritmy 6.3.2 až 6.3.4 zanášejí naměřené souřadnice do kartézského souřadnicového systému. Osa X při vykreslení reprezentuje souřadnici X a osa Y souřadnici Y. Vykreslené body v rovině jsou barevně škálovány. Barva každého bodu reprezentuje počet výskytu dané souřadnice, tj. kolikrát se tag v tomto bodě nacházel (modrá - nejméně, červená - nejvíce) a je shodná s barvou sloupce v obrázku 6.10. Vzorová barevná škála je zobrazena na obrázku níže.

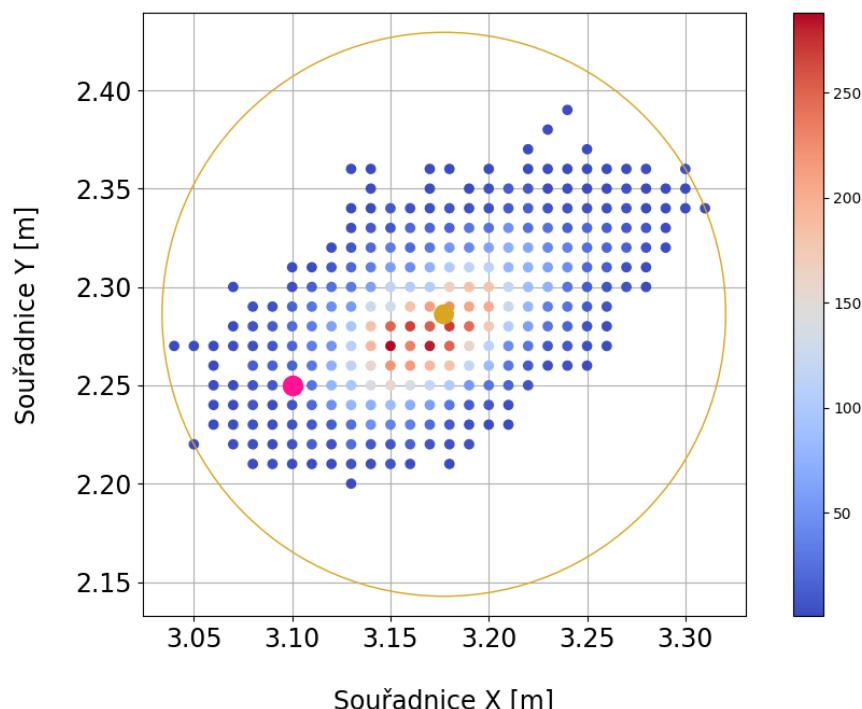


Obrázek 6.11: Barevná škála

S takto vykreslenými daty do roviny jsou provedeny operace, které jsou postupně vysvětleny v následujících kapitolách.

6.3.2 Opsaná kružnice

Tento algoritmus vytváří kolem bodů vykreslených do roviny kružnici. Kružnice je naprogramována tak, aby v sobě obsahovala všechny vykreslené body a zároveň měla co nejmenší poloměr (prochází vždy třemi nejvzdálenějšími body od jejího středu). Na následujícím obrázku je znázorněna popsaná situace. Ve 2D rovině jsou vyneseny všechny body a okolo těchto bodů je žlutě vytvořena kružnice. Střed kružnice je na obrázku znázoren žlutým bodem. Růžový bod značí referenční hodnotu. Barevná stupnice (škála) je zobrazena vedle obrázku.

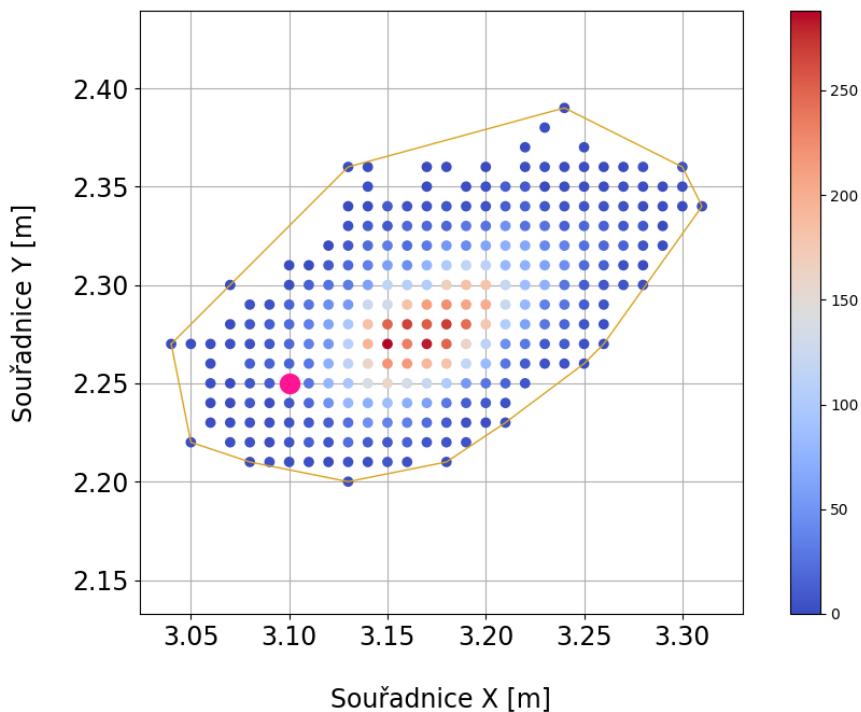


Obrázek 6.12: Vyhodnocení - opsaná kružnice

Popsaný algoritmus byl navržen pro účely lepšího vizuálního porovnání jednotlivých měření. Takto vytvořené kružnice byly pro všechna měření zaneseny do půdorysu místnosti.

6.3.3 Konvexní obal

Další algoritmus formuje kolem vykreslených dat v rovině konvexní obal. Ohraničením všech bodů vznikne obrazec, u kterého je spočtena plocha, kterou zaujímá. Vykreslení konvexního obalu kolem dat je znázorněno na obrázku níže žlutou linií. Data jsou také barevně škálována. Růžovou barvou je opět znázorněna referenční hodnota.



Obrázek 6.13: Vyhodnocení - konvexní obal

Vypočtená plocha představuje zdánlivou plochu výskytu tagu v průběhu měření. Jedná se o zdánlivou plochu, neboť tag v průběhu celého experimentu spočíval v nehybné poloze.

6.3.4 Geometrický medián, aritmetický průměr, nejčastější hodnota 3D graf

Pro určení dosahované přesnosti v průběhu měření je třeba vymezit rozdíl mezi referenční hodnotou (tj. skutečnou polohou tagu v laboratoři) a hodnotou lokalizovanou (tj. polohu tagu určenou pomocí lokalizační technologie). Naměřená lokalizační data jsou tvořena řádově tisíci body, proto pro vypočtení tohoto rozdílu je nezbytné určit jeden bod, který zastupuje všechny naměřené hodnoty. Tento bod je následně možné porovnat s referenčním bodem a určit tak rozdíl mezi referenční a lokalizovanou hodnotou, neboli výslednou přesnost lokalizace.

Pro vypočtení bodu, který reprezentuje všechny naměřené body v rovině, byly vybrány následující algoritmy.

a) Geometrický medián

Geometrický medián je bod, který minimalizuje součet vzdáleností k vykresleným bodům. Jedná se tedy o takový bod, který má od všech vykreslených bodů v rovině nejmenší vzdálenost.

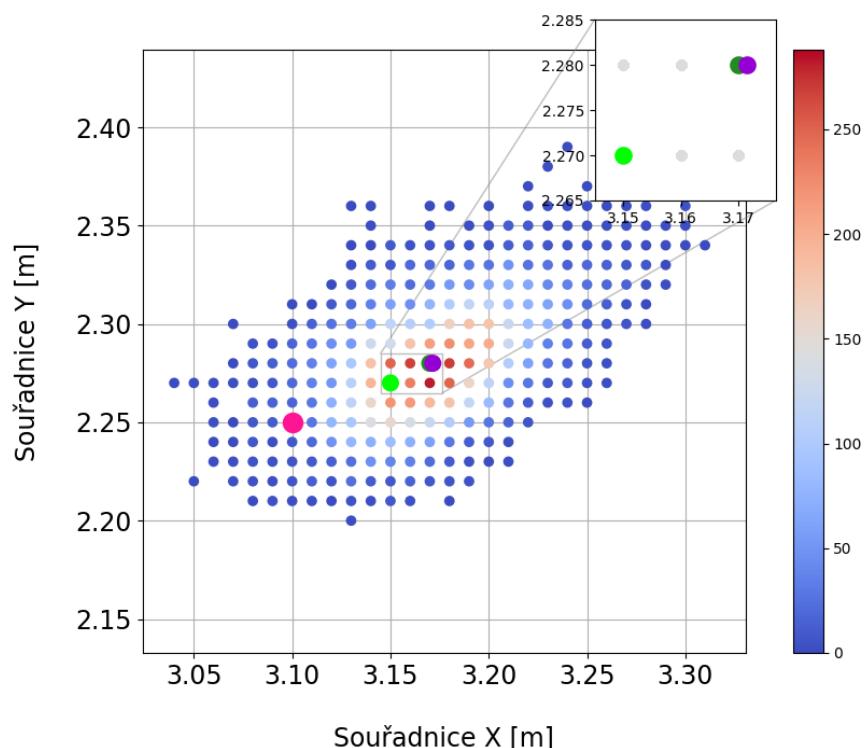
b) Aritmetický průměr

Aritmetický průměr bodů, definovaných přes souřadnice X a Y, byl vypočten zvlášť pro souřadnice X a zvlášť pro souřadnice Y.

c) Nejčastější hodnota - 3D graf

Z 3D grafu zobrazeného na obrázku 6.10 byla zaznamenána a do grafu vykreslena nejčastěji se vyskytující souřadnice bodu, tzv. modus.

Všechny výše vypočtené veličiny byly vyneseny do grafu, který je zobrazen níže. Růžová barva v grafu je opět vyčleněna referenční hodnotě. Vypočtený geometrický medián je znázorněn tmavě zelenou barvou. Průměr z dat reprezentuje barva fialová. Světle zelená barva zastupuje nejčastěji se vyskytující hodnotu z 3D grafu.



Obrázek 6.14: Vyhodnocení - vypočtené středy naměřené množiny bodů

Pro každý bod, určený pomocí algoritmů (a) - (c), byla určena jeho vzdálenost od referenčního bodu, která byla zanesena do tabulky (viz tabulka 6.1).

Tabulka 6.1: Vypočtené vzdálenosti od referenční hodnoty - vzor

	Vzdálenost od referenční hodnoty
Geometrický medián	7.6 cm
Aritmetický průměr	7.8 cm
Nejčastější hodnota-3D graf	5.3 cm

Z takto získaných vzdáleností byla zjištěna jejich střední hodnota. Vypočtená střední hodnota představuje průměrnou vzdálenost naměřené množiny bodů od reference a reprezentuje tak dosahovanou přesnost. Na tomto základě lze vyhodnotit přesnost technologie UWB za různých podmínek lokalizace.

6.3.5 Rozptyl, směrodatná odchylka, variační koeficient

V rámci téhož programu byla rovněž definována funkce pro výpočet rozptylu a směrodatné odchylky. Variace a směrodatná odchylka umožňují vyjádřit míru variability datového souboru. Rozptyl bodů byl počítán zvlášť pro souřadnice X a Y. Z vypočtených rozptylů byla následně určena směrodatná odchylka (jakožto odmocnina z rozptylu), taktéž zvlášť pro každou souřadnici.

Pro vzájemné porovnání různých měření je navíc určen ještě tzv. variační koeficient, opět separátně pro osu X a Y. Ten slouží k porovnání variability dat mezi různými soubory s různými středními hodnotami. V této práci jsou jednotky variačního koeficientu vyjádřeny v procentech a zaneseny do tabulky, společně s průměrnou hodnotou vypočtenou ze souřadnic X a Y.

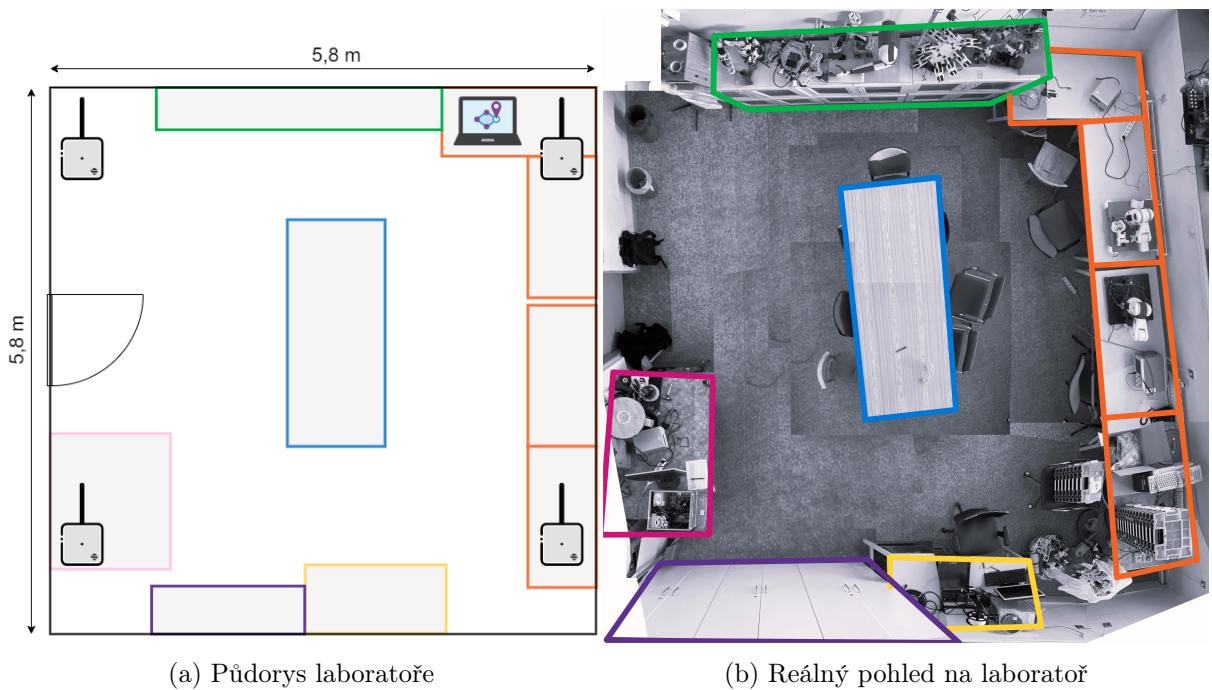
Konkrétní výsledky z provedených experimentů ze všech výše popsaných způsobů vyhodnocení jsou uvedeny v následujících kapitolách. Při konkrétních výsledcích již nebude řešen význam ani metodika zpracování dat, neboť to bylo hodnoceno v této kapitole. Text se bude soustředit zejména na interpretaci dosažených výsledků.

6.4 Experiment v laboratoři robotů

Tento experiment se uskutečnil v laboratoři robotů v prostorách ČVUT. V laboratoři o výměře přibližně 36 m^2 byly rozestavěny celkem 4 vysílače. Při instalaci vysílačů byla dodržována všechna pravidla popsána v kapitole 6.1.

Samotné prostředí laboratoře není nikterak náročné. V místnosti se sice nachází předměty (skříně, stoly, apod.), ale ty nijak výrazně nebrání přímé viditelnosti mezi jednotlivými vysílači, ani mezi vysílači a lokalizačním zařízením. V místnosti se rovněž nevykytují výraznější zdroje elektromagnetického rušení.

Na obrázku 6.15 (a) je vidět půdorys laboratoře s polohou rozmístění kotev. Na obrázku 6.15 (b) je potom vidět reálný pohled na laboratoř shora. Sobě odpovídající si objekty jsou na obrázcích (a) a (b) ohrazeny stejnou barvou.



Obrázek 6.15: Laboratoř robotů

Experiment se skládal z provedení celkem osmi měření, kde každé z nich trvalo deset minut. Při měřeních bylo lokalizační zařízení vždy umístěno na jiné náhodně vybrané pozici (místě) a po celou dobu trvání měření tag spočíval v neměnné poloze. Pomocí laserového dálkoměru byla zaměřena referenční poloha každé pozice (umístění) tagu v laboratoři. Během celého experimentu se ukládala příchozí lokalizační data z tagu.

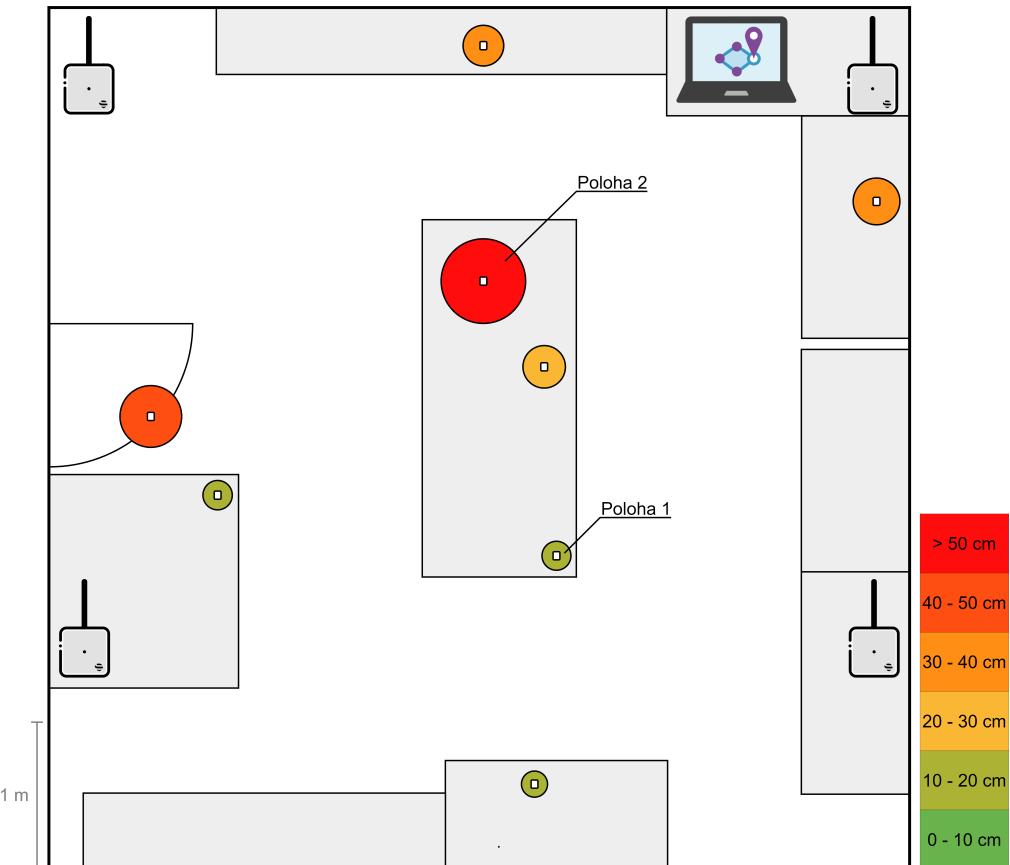
Všechna naměřená data byla zpracována a vyhodnocena. Z vytvořených výstupů byla vybrána a dále jsou ukázána dvě měření, na základě kterých byl celý experiment vyhodnocen. Tyto vybraná měření reprezentují nejlepší a nejhorší dosažené výsledky při tomto experimentu a vytváří tak pomyslný rozsah fungování technologie za popsaných podmínek. Rozhodovací kritérium při selekci výstupů byla přesnost měření. K vyhodnocení byly vybrány soubory naměřených bodů s nejmenší a naopak největší dosaženou přesností. Všechny ostatní naměřené hodnoty se, co do výsledné přesnosti, nachází v intervalu, jehož krajní hodnoty jsou tvořeny přesnostmi z vybraných měření.

Vybraná data k vyhodnocení byla pořízena na pozici lokalizačního zařízení, které jsou na obrázku 6.16 označeny jako Poloha 1 a Poloha.

V rozsahu tohoto experimentu je zobrazeno zpracování vybraných měření pouze pomocí statistických ukazatelů a dosahovaných přesností. Grafické vyhodnocení měření v této kapitole zobrazeno není a namísto toho je dostupné v příloze této práce. Společně s ním je v příloze uvedeno rovněž statistické zpracování naměřených dat. Výsledky jsou dobře pochopitelné i za pomoci statistických ukazatelů a není nutné práci zahrnovat dalšími obrázky, neboť i tak je v tomto směru dosti rozsáhlá.

Grafické vyhodnocení je provedeno v kapitole 6.5, kde tento způsob posouzení dat mnohem lépe zapadá do celkového kontextu analýzy a porovnání naměřených bodů.

Na obrázku 6.16 jsou bílými obdélníky zakresleny reálné polohy tagu. Barevný kruh kolem každého tagu znázorňuje kružnice popsanou v kapitole 6.3.2. Tag je umístěn vždy uprostřed této kružnice, které jsou barevně škálovány. Zelená barva odpovídá nejmenšímu průměru kružnice a barva červená naopak průměru největšímu. Rozpětí průměrů, podle kterého byly kružnice barevně škálovány, jsou zaznamenány po pravé straně obrázku.



Obrázek 6.16: Zobrazení měřených poloh tagů

6.4.1 Poloha 1

Umístění lokalizačního zařízení na této poloze poskytovalo nejkvalitnější výsledky z hlediska přesnosti měření. Po celou dobu měření bylo celkem shromážděno 3 197 bodů. Po odstranění opakujících se bodů byl počet redukován na 197 hodnot.

Vypočtené vzdálenosti naměřeného datasetu od referenční hodnoty jsou zaneseny do tabulky 6.2. Průměrná dosahovaná přesnost při tomto měření je 7,5 cm.

Tabulka 6.2: Vypočtené vzdálenosti od referenční hodnoty - poloha 1

	Vzdálenost od referenční hodnoty
Geometrický medián	8.1 cm
Aritmetický průměr	8.0 cm
Nejčastější hodnota-3D graf	6.3 cm

Statistická analýza zkoumaných dat je, prostřednictvím vybraných ukazatelů, zobrazena v další tabulce.

Tabulka 6.3: Statistické vyhodnocení - poloha 1

	Osa X	Osa Y
Střední hodnota	346.839 cm	364.192 cm
Rozptyl	5.897 cm ²	7.827 cm ²
Směrodatná odchylka	2.428 cm	2.798 cm
Variační koeficient	0.700 %	0.768 %

6.4.2 Poloha 2

Přesnost, které bylo docíleno při tomto umístění lokalizačního zařízení, dosáhla ze všech vyhodnocených měření nejnižší hodnoty. Celkový počet naměřených bodů je roven 3 975. Po odebrání duplicitních záznamů vznikl soubor s 366 hodnotami.

Vypočtené vzdálenosti reference od naměřeného datasetu jsou číselně vyjádřeny v Tabulce 6.4. Průměrná dosažená přesnost činí 8,6 cm.

Tabulka 6.4: Vypočtené vzdálenosti od referenční hodnoty - poloha 2

	Vzdálenost od referenční hodnoty
Geometrický medián	9.0 cm
Aritmetický průměr	8.9 cm
Nejčastější hodnota-3D graf	8.0 cm

V následující tabulce jsou spočteny statistické veličiny pro zkoumaný dataset bodů. Číselné výsledky těchto veličin jsou uvedeny zvlášť pro osu X a osu Y.

Tabulka 6.5: Statistické vyhodnocení - poloha 2

	Osa X	Osa Y
Střední hodnota	275.089 cm	198.913 cm
Rozptyl	13.037 cm ²	16.894 cm ²
Směrodatná odchylka	3,611 cm	4,110 cm
Variační koeficient	1,313 %	2,066 %

6.4.3 Vyhodnocení

Odchylka od střední hodnoty u prvního nejlépe hodnoceného měření je 2,4 cm v ose X a 2,8 cm v ose Y. Při posouzení nejhoršího měření tatáž statistická veličina dosahuje hodnot 3,6 cm v ose X a v ose Y 4,1 cm. Pro lepší pochopení míry variability dat budou tyto hodnoty vyjádřeny ve formě variačního koeficientu.

Variační koeficient prvního měření v ose X činí 0,7 %. V ose Y se tato hodnota rovná 0,768 %. Takto nízký variační koeficient vypovídá o tom, že všechny body jsou v blízkém okolí své střední hodnoty a mají malou rozmanitost. Při nejhůře hodnoceném měření mají variační koeficienty hodnoty 1,313 % v ose X a 2,066 % v ose Y. Tyto hodnocená data poskytovala ze všech změřených dat nejhorší výsledky z hlediska přesnosti, nicméně procentuální hodnoty variačních koeficientů, a tudíž rozptyl dat, lze i v tomto případě považovat za malé. Zjištěné výsledky i v tomto měření vypovídají o velké homogenitě dat, a tudíž o jejich malé rozličnosti.

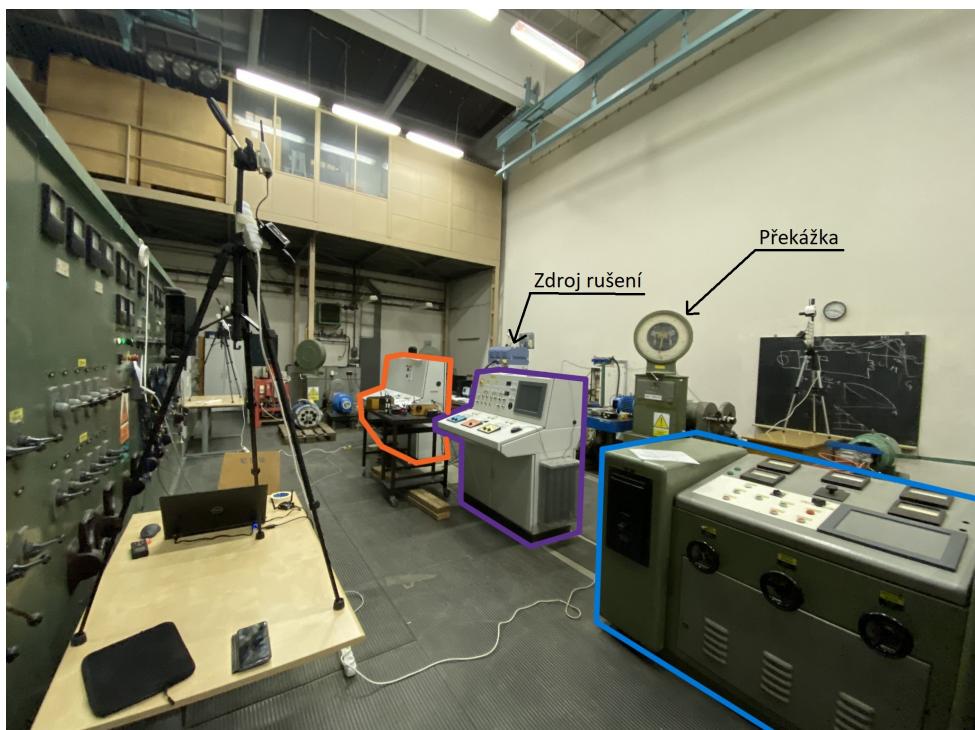
V této práci je taktéž posuzována dosahovaná přesnost. Průměrná dosahovaná přesnost prvního měření je 7,5 cm. U druhého měření je tato přesnost 8,6 cm. Největší přesnosti bylo v obou měření dosaženo pomocí algoritmu vypočítávající vzdálenost od nejčastěji se vyskytující souřadnice z 3D grafu.

Výsledky získané v tomto experimentu jsou důležité jak z hlediska kvality dosažených výsledků, tak i kvantity měření a utváří tak obecný závěr o fungování technologie UWB

6.5 Experiment v laboratoři elektromotorů

Tento experiment byl vykonán v laboratoři elektromotorů. Charakter tohoto prostředí je o něco náročnější a komplikovanější než v případě experimentu 6.4. V místnosti se nachází motory, skříně a jiné objekty převážně železné konstrukce. Tento prostor o celkové výměře zhruba 64 m^2 se z hlediska vlastností prostředí mnohem více podobá tomu prostředí, ve kterém by technologie měla být nasazena (viz kapitola 2).

Prostředí laboratoře, ve kterém byl experiment realizován, ukazuje obrázek 6.17. Na obrázku je vyznačen zdroj rušení, tj. dynamometr, a také překážka v podobě masivního železného ukazatele. Barevné označení objektů koresponduje s obrázkem 6.18, kde jsou odpovídající objekty v půdorysu ohraničeny stejnou barvou.



Obrázek 6.17: Laboratoř elektromotorů

Stejně jako v předchozím případě, bylo i v této laboratoři provedeno několik měření, při kterých se lokalizační zařízení nacházelo na různých pozicích. Experiment se odlišuje v tom, že pro každé umístění tagu (pozici) byla provedena právě dvě měření. Celkově tedy bylo realizováno 6 měření na třech vybraných pozicích.

První měření

První měření vždy reprezentuje experiment, v jehož průběhu nebyl aktivní zdroj elektromagnetického rušení (dynamometr). Naměřená data byla ovlivněna pouze rušením vyplývajícím z charakteru prostředí. V části vyhodnocení dat se lze setkat s označením nezarušená data či data bez rušení. Takto pojmenovaná data reprezentují body získané z tohoto měření.

Průběh prvního měření byl naprosto stejný postupu uvedenému v kapitole 6.4 Experiment v laboratoři robotů. Lokalizační zařízení nehybně leželo na jednom místě po dobu deseti minut. Po celý čas experimentu byla z tagu odebírána a ukládána příchozí lokalizační data. Po skončení prvního měření následovalo měření druhé.

Druhé měření

Poloha tagu i délka trvání měření byly totožné jako v případě prvního měření. Taktéž v jeho průběhu docházelo k ukládání příchozích dat z tagu. Navíc po celou dobu trvání tohoto měření byl v místnosti zapnut dynamometr, který kromě elektromagnetického rušení generoval i výrazné vibrace. Zapnutím dynamometru byl simulován zejména vliv elektromagnetického rušení na výslednou přesnost lokalizace. Takto získaná data je možné ve zbývajícím textu práce nalézt pod označením zarušená data.

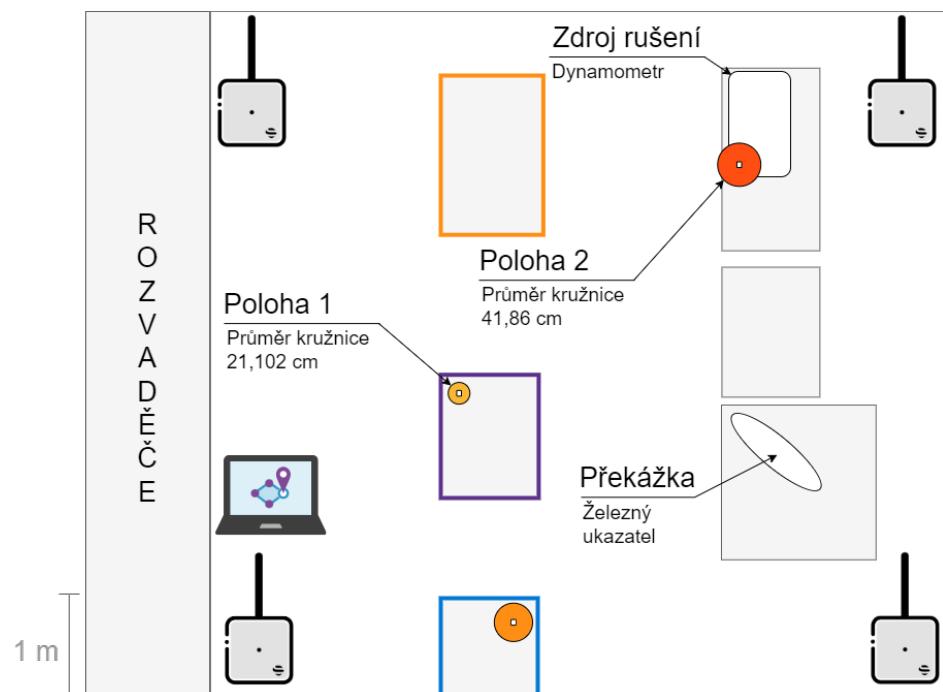
Vyhodnocení

Uložená data z prvního a druhého měření byla zpracována a vyhodnocena. Vyhodnocení bylo provedeno jak pro každé měření zvlášť, tak i pro obě měření dohromady (data byla porovnána vzájemně mezi sebou). V této kapitole je provedeno jednak statistické, tak i grafické vyhodnocení dat.

Naměřená data, která byla zvolena k analýze a zpracování v rámci této kapitoly, byla vybrána na základě identické myšlenky jako v kapitole 6.4 - nejvyšší a nejnižší dosažená přesnost při měření. Při srovnání byla zohledněna dosažená přesnost z prvního (nezarušeného) měření. Vybraná data byla zanalyzována a vyhodnocena prostřednictvím grafických a statistických metod. Vyhodnocením těchto dvou měření je zhodnocen celý experiment, neboť přesnosti ze všech zbylých měření se nachází v rozmezí hodnot, které je tvořeno přesnostmi z vybraných měření. Shrnutí experimentu touto formou pojednává o vlastnostech technologie UWB za specifikovaných podmínek.

Na obrázku 6.18 je vidět zmíněný půdorys laboratoře. Na něm jsou vyznačeny přibližné polohy umístění kotev společně s měřenými polohami tagu (zakresleno jako bílý obdélník). Okolo tagu, stejně jako v předchozím případě, je vykreslena kružnice definovaná v kapitole 6.3.2. Pro vytvoření kružnic byla použita data z druhého měření. Výsledné poloměry

kružnic jsou v obou případech měření (zarušené a nezarušené) velmi totožné a případný rozdíl není v použitém měřítku okem pozorovatelný.



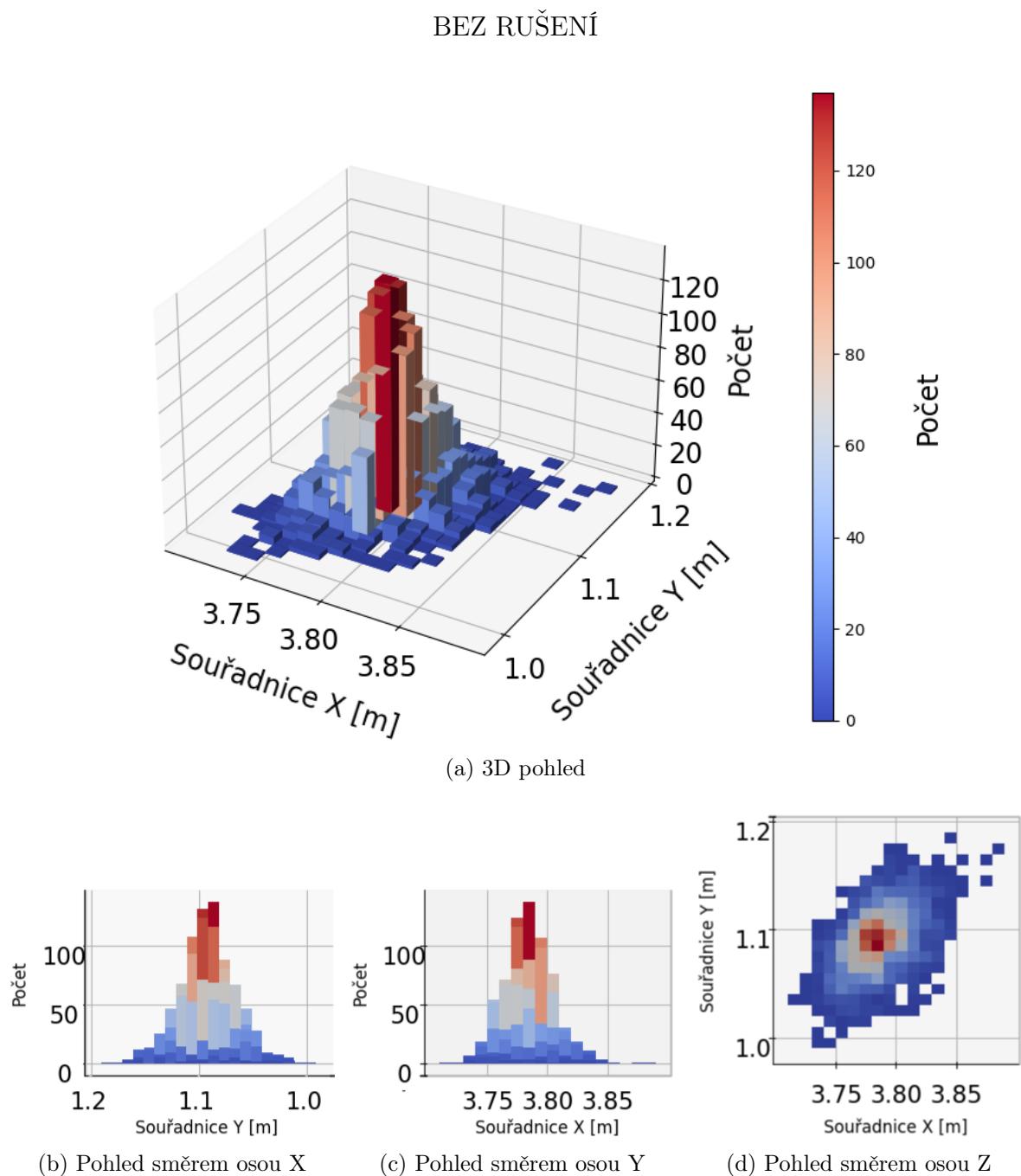
Obrázek 6.18: Půdorys laboratoře motorů

Vyhodnocení vybraných měření jsou ukázána a popsána v následujících kapitolách.

6.5.1 Výsledky z experimentu - poloha 1

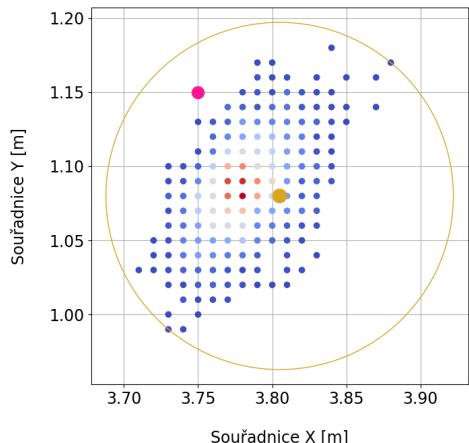
Poloha 1: Měření první

Měření probíhalo dle postupu, který byl popsán v předešlé kapitole. V průběhu celého měření bylo nasbíráno celkem 3 453 bodů. Po redukci opakujících se bodů vznikl soubor obsahující 163 unikátních bodů. Na obrázku 6.19 jsou do 3D grafu vykreslena naměřená data nezatížena aditivním rušením z dynamometru.

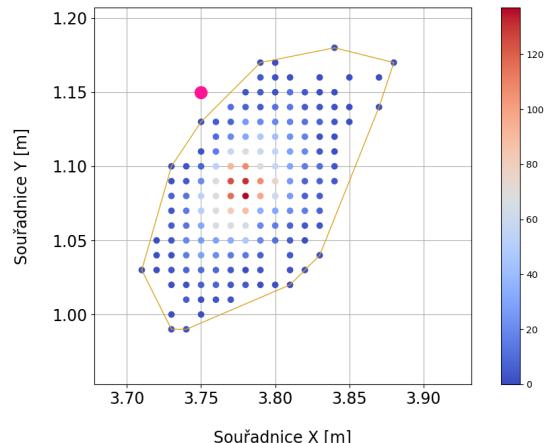


Obrázek 6.19: Vyhodnocení 3D grafu - první (nezarušené) měření poloha 1

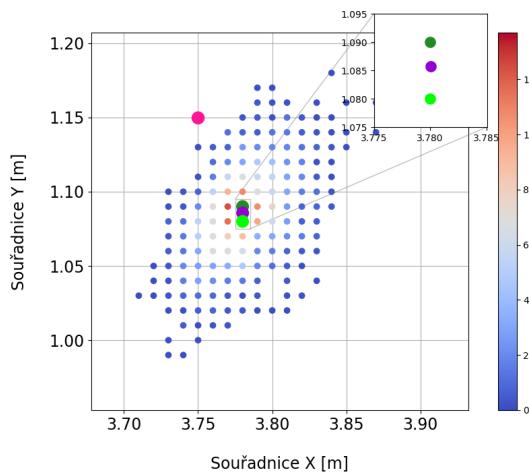
Na následujících obrázcích jsou vykresleny naměřené body do roviny XY. Obrázek 6.20 (d) specifikuje a numericky vyčísluje jednotlivé body na obrázcích 6.20 (a) - (c).



(a) Opsaná kružnice



(b) Konvexní obal



(c) Aritmetický průměr, geometrický medián, nejčastější hodnota z 3D grafu

Referenční hodnota	$x = 3.750, y = 1.150 \text{ m}$	●
a)		
Poloměr opsané kružnice	$r = 11.715 \text{ cm}$	○
Střed kružnice opsané	$x = 3.805, y = 1.080 \text{ m}$	●
b)		
Plocha vzniklého obrazce	$S = 191.500 \text{ cm}^2$	□
c)		
Průměr	$x = 3.780, y = 1.086 \text{ m}$	●
Geometrický medián	$x = 3.780, y = 1.090 \text{ m}$	●
Nejčastější hodnota-3D graf	$x = 3.780, y = 1.080 \text{ m}$	●

(d) Popis dat

Obrázek 6.20: 2D Vyhodnocení - první (nezarušené) měření poloha 1

Vzdálenosti bodů zastupující množinu naměřených hodnot od referenční hodnoty jsou zaznamenány do tabulky 6.6 (a). V tabulce 6.6 (b) jsou vypočteny rozptyly a směrodatné odchylky pro souřadnice X a Y vyhodnocovaného datasetu.

Tabulka 6.6: Analytické a statistické vyhodnocení - první (nezarušené) měření poloha 1

(a) Vypočtené vzdálenosti od referenčního bodu

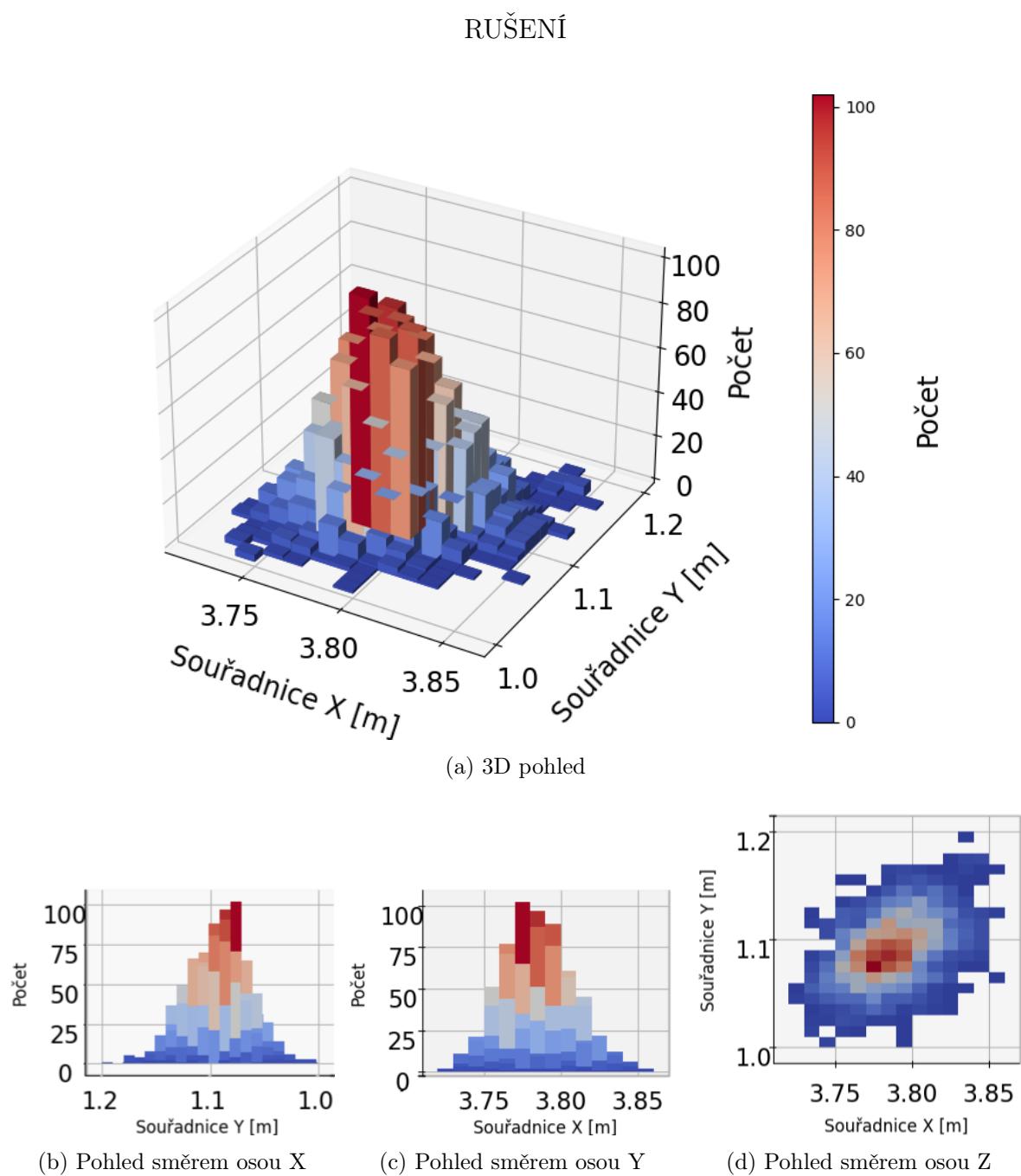
	Vzdálenost od referenční hodnoty
Geometrický medián	6.7 cm
Aritmetický průměr	7.1 cm
Nejčastější hodnota-3D graf	7.6 cm

(b) Rozptyl a směrodatná odchylka

	Osa X	Osa Y
Rozptyl	4.352 cm ²	6.616 cm ²
Směrodatná odchylka	2.086 cm	2.572 cm

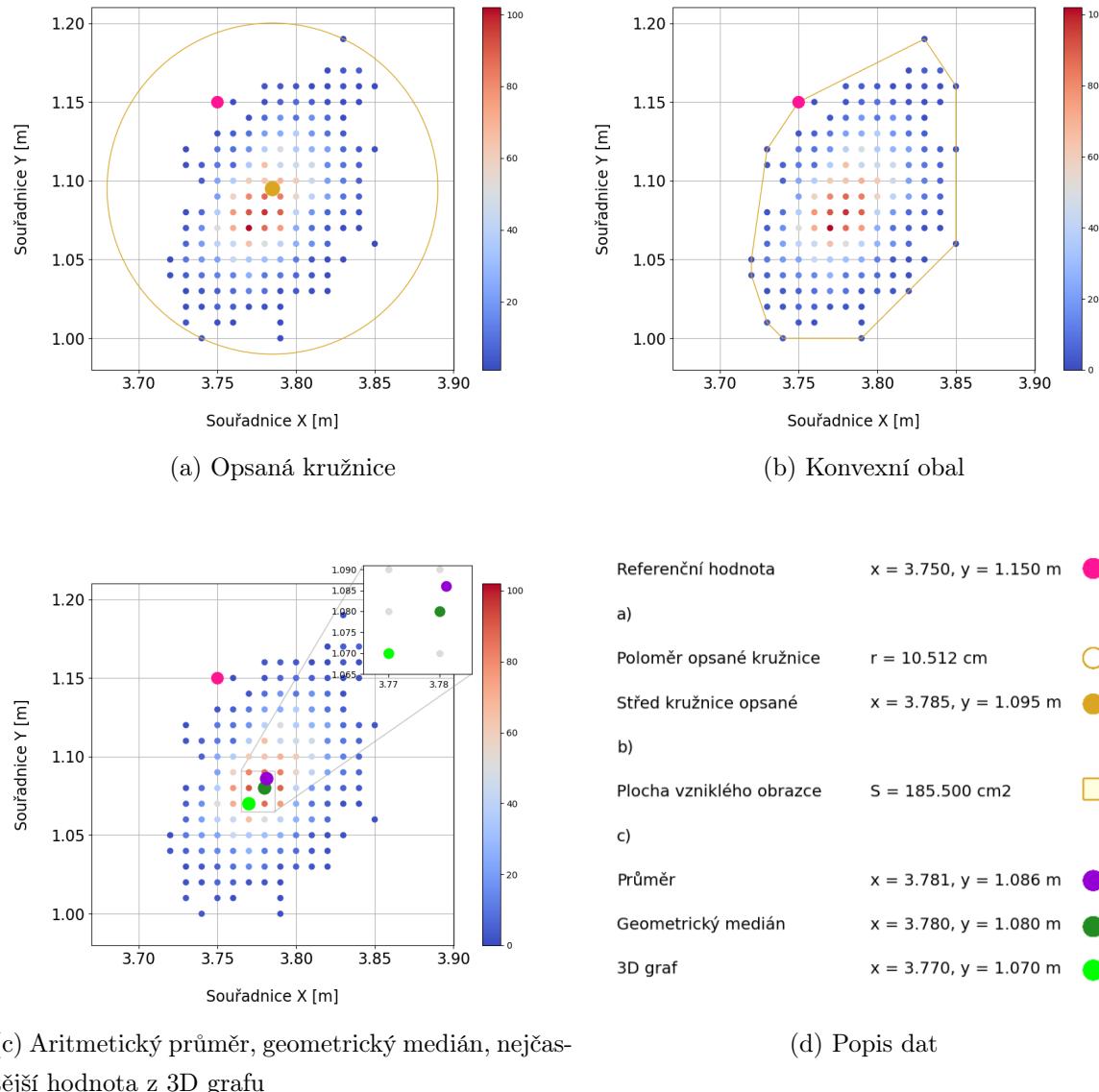
Poloha 1: Měření druhé

Po uplynutí doby trvání prvního měření bylo uskutečněno měření druhé. Při tomto měření byl spuštěn dynamometr, jakožto zdroj elektromagnetického rušení a vibrací. Celkový počet naměřených bodů dosáhl 3 264 hodnot. Soubor s redukovanými body čítal 163 hodnot, tedy stejný počet jako v případě prvního měření. Vyhodnocení dat z tohoto měření formou 3D grafu je zobrazeno na dalších obrázcích.



Obrázek 6.21: Vyhodnocení 3D graf - druhé (zarušené) měření poloha 1

Stejně jako v předešlém případě i tyto naměřená data byla zanesena do roviny XY a v této rovině zpracována, viz obrázek 6.22.



Obrázek 6.22: 2D vyhodnocení - druhé (zarušené) měření poloha 1

Vzdálenosti všech vypočtených bodů, reprezentující naměřený dataset, od referenční hodnoty jsou uvedeny v tabulce 6.7 (a). Tabulka 6.7 (b) numericky vyčísluje a rozptyl a směrodatnou odchylku v osách X a Y.

Tabulka 6.7: Analytické a statistické vyhodnocení - druhé (zarušené) měření poloha 1

(a) Vypočtené vzdálenosti od referenčního bodu

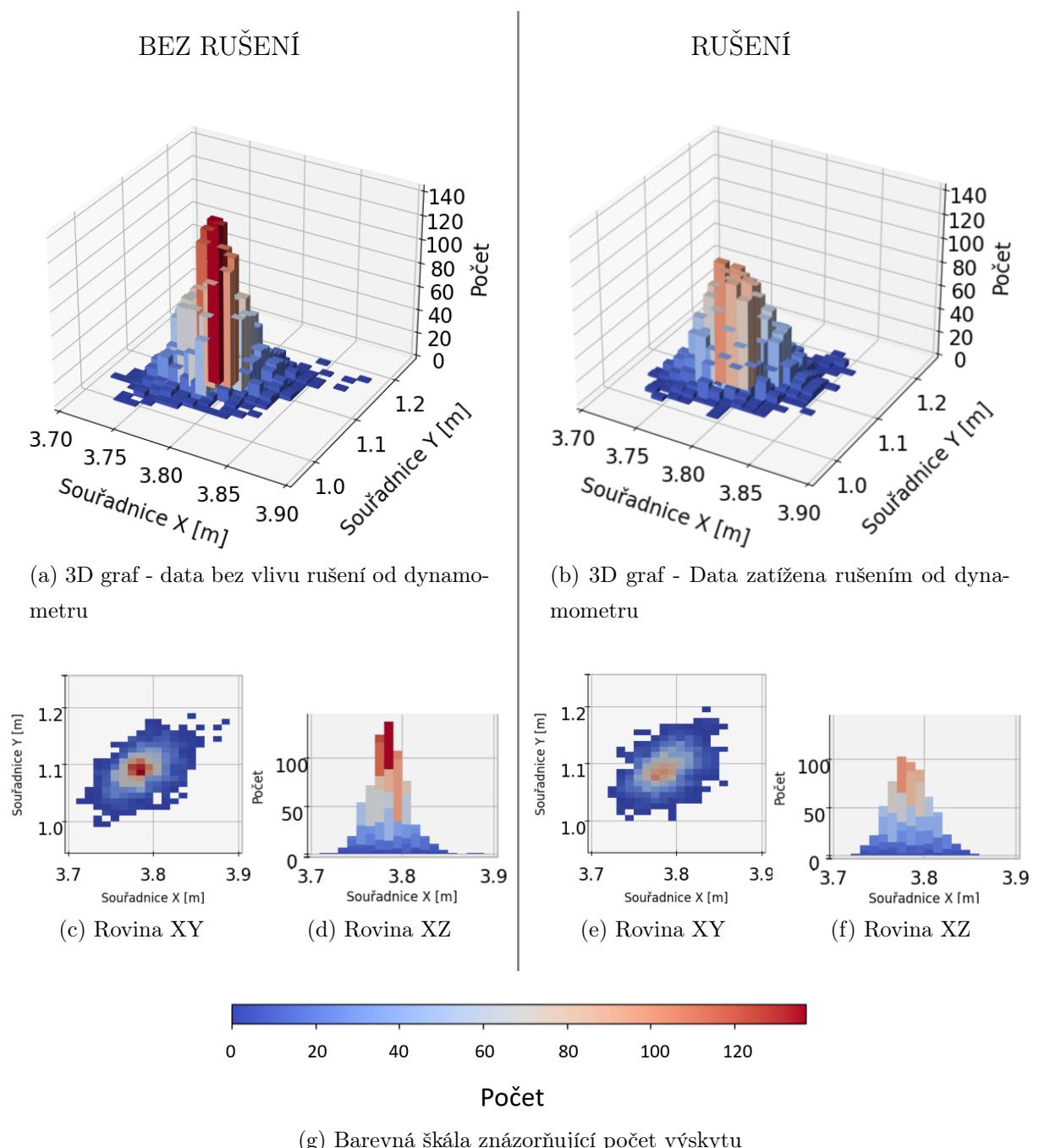
	Vzdálenost od referenční hodnoty
Geometrický medián	7.6 cm
Aritmetický průměr	7.1 cm
Nejčastější hodnota-3D graf	8.2 cm

(b) Rozptyl a směrodatná odchylka

	Osa X	Osa Y
Rozptyl	4.857 cm ²	7.296 cm ²
Směrodatná odchylka	2.204 cm	2.701 cm

6.5.2 Porovnání výsledků experimentu - poloha 1

Na obrázku 6.23 jsou porovnány výsledky z obou měření. V levé části stránky jsou vykreslena data nezatížená rušením generovaným dynamometrem. V pravé části jsou naopak vyhodnocena ta data, při jejichž měření byl zapnut zdroj rušení a vibrací (dynamometr). Hlavní objekty obrázku jsou prostorové 3D grafy. Pod 3D grafy se nachází vhledy do roviny XY a XZ 3D grafů. Odpovídající si osy grafů jsou ve stejném měřítku, aby bylo možné výsledky měření snadněji porovnat.



Obrázek 6.23: Porovnání 3D grafů - poloha 1

Při pouhém vizuálním zkoumání obrázku 6.23 lze pozorovat nepatrný rozdíl ve vykreslených 3D grafech. A to konkrétně ve výšce sloupců, které reprezentují, kolikrát se tag vyskytl na dané souřadnici. Maximální výška 3D grafu vykreslená z dat prvního měření je větší, než v případě dat zarušených, kde je maximální výška 3D grafu viditelně menší. Nicméně je to patrně jediná výrazná odlišnost, kterou lze z grafu 6.23 na první pohled určit. Počet sloupců v grafu, tedy celkový počet neopakujících se bodů, je v obou případech měření stejný, a je roven 163 sloupcům. Rovněž i velikosti ploch vytvořených konvexních obrazců jsou takřka srovnatelné. Plocha, kterou zaujímají naměřené body po vykreslení do roviny XY, je v případě prvního měření rovna 192 cm^2 . U druhého (zarušeného) měření je tato plocha překvapivě menší a rozkládá se na 186 cm^2 . Oba naměřené soubory bodů vykreslené do rovin XY i XZ jsou velmi podobně rozloženy. Kromě barevného podání (tj. zmíněné výšky) nedošlo vlivem rušení k výraznějšímu odchýlení těchto naměřených bodů od dat, které byly pořízeny v prvním měření.

Dále je provedeno vyhodnocení naměřených dat pomocí vybraných statistických ukazatelů. Tyto metriky mají za úkol spolehlivě analyzovat naměřená data, na základě čeho bude možné všechna porízená měření vyhodnotit, porovnat a stanovit výsledky experimentů. V následujících odstavcích je posuzována homogenita zkoumaných souborů.

Pro obě měření (nezarušené i zarušené) byly vypočteny rozptyly a směrodatné odchylky v osách X a Y. Jejich numerické vyčíslení je zaneseno do tabulky 6.8. Poslední sloupec tabulky představuje rozdíl statistických veličin zarušeného (M2) a nezarušeného měření (M1).

Tabulka 6.8: Analytické a statistické vyhodnocení - porovnání měření poloha 1

	Měření 1 (M1) - nezarušená data	Měření 2 (M2) - zarušená data	Rozdíl M2 - M1
Rozptyl v ose X	4.352 cm^2	4.857 cm^2	0.505 cm^2
Rozptyl v ose Y	6.616 cm^2	7.296 cm^2	0.680 cm^2
Směrodatná odchylka osa X	2.086 cm	2.204 cm	0.118 cm
Směrodatná odchylka osa Y	2.572 cm	2.701 cm	0.129 cm

Směrodatná odchylka, nebo-li odchylka od průměrné hodnoty, je pro obě měření jak v ose X, tak i v ose Y téměř identická. Průměrné hodnoty naměřených souřadnic X a Y jsou zobrazeny v tabulce 6.9. Rozdíl hodnot směrodatných odchylek, vypočtených z prvního a druhého měření, je jak v ose X, tak v ose Y v řádech desetin milimetru. Zjištěné hodnoty statistických veličin indikují malou variabilitu dat.

Pro lepší představu a prezentování podobnosti obou datasetů byl určen variační koeficient. Tento koeficient variability je uveden ve stejně tabulce jako průměry hodnot vypočtené z naměřených souřadnic X a Y.

Tabulka 6.9: Variační koeficient - porovnání měření poloha 1

	Měření 1 (M1) - nezarušená data	Měření 2 (M2) - zarušená data
Průměrná hodnota osa X	378.005 cm	378.132 cm
Průměrná hodnota osa Y	108.568 cm	108.595 cm
Variační koeficient osa X	0.552 %	0.583 %
Variační koeficient osa Y	2.369 %	2.487 %

Procentuální nárůst variačního koeficientu druhého měření oproti prvnímu je v ose X o pouhých 0,031 %. V ose Y je tento nárůst 0,118 %. Na odchylce variačních koeficientů pro jednotlivá měření je vidět opravdu nepatrný vliv elektromagnetického rušení na naměřená data.

Vzdálenosti bodů reprezentující soubor naměřených dat od referenční hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 6.10: Vypočtené vzdálenosti od referenční hodnoty porovnání - poloha 1

Vzdálenost od referenční hodnoty	Měření 1 (M1) - nezarušená data	Měření 2 (M2) - zarušená data	Rozdíl M2 - M1
Geometrický medián	6.7 cm	7.6 cm	0.9 cm
Aritmetický průměr	7.1 cm	7.1 cm	0.0 cm
Nejčastější hodnota-3D graf	7.6 cm	8.2 cm	0.6 cm

Průměrná přesnost, které bylo dosaženo v průběhu nezarušeného měření, je 7,1 cm. Zatímco v případě zarušených dat 7,7 cm. Rozdíl mezi těmito dvěma vypočtenými hodnotami činí pouhých 0,6 cm. Hodnoty rozdílů pro konkrétní algoritmy a měření jsou uvedeny v tabulce 6.10.

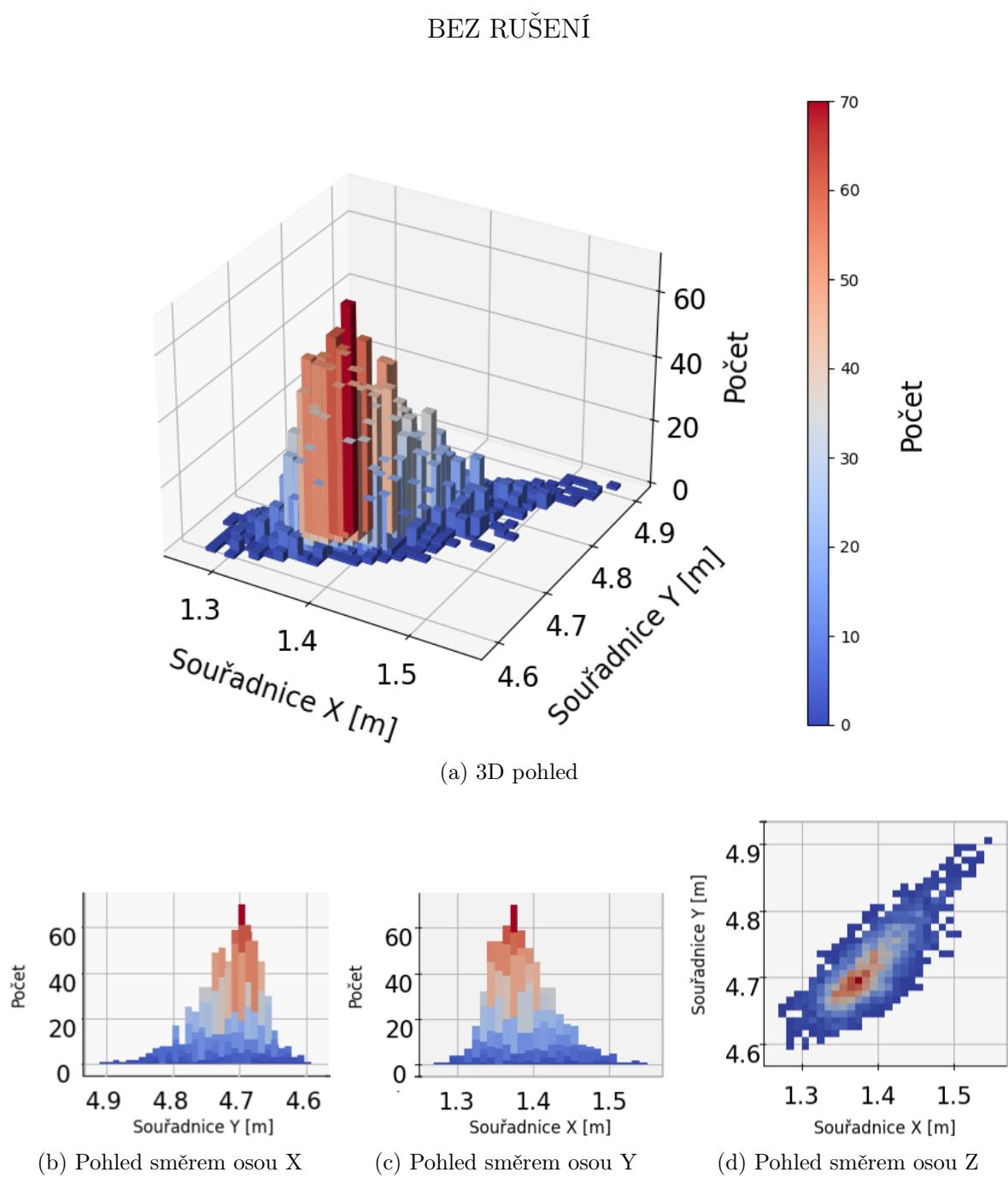
Všechny statistické ukazatele, včetně variačních koeficientů, dosahují malých hodnot, což signalizuje malý rozptyl. To indikuje spolehlivost dat jak prvního, tak ale zejména naměřených dat z druhého měření, neboť tato data byla zatížena elektromagnetickým rušením. Dle popsaného vyhodnocení vykazují oba naměřené soubory bodů malou rozmanitost a rozptyl.

Na základě vyhodnocení prostřednictvím statistických metrik lze konstatovat, že oba naměřené datasety bodů jsou jak samostatně, tak i vůči sobě značně homogenní. Vlivem elektromagnetického rušení nedojde k témuž žádnému zvětšení variability souboru zarušených dat ani k výraznému odchýlení zarušených dat od dat nezarušených. Vyhodnocení prostřednictvím statistických ukazatelů je v souladu s vypočtenou dosahovanou přesností. Vlivem rušení došlo k odchýlení průměrné dosahované přesnosti druhého měření od měření prvního o pouhých 0,6 cm.

6.5.3 Výsledky z experimentu - poloha 2

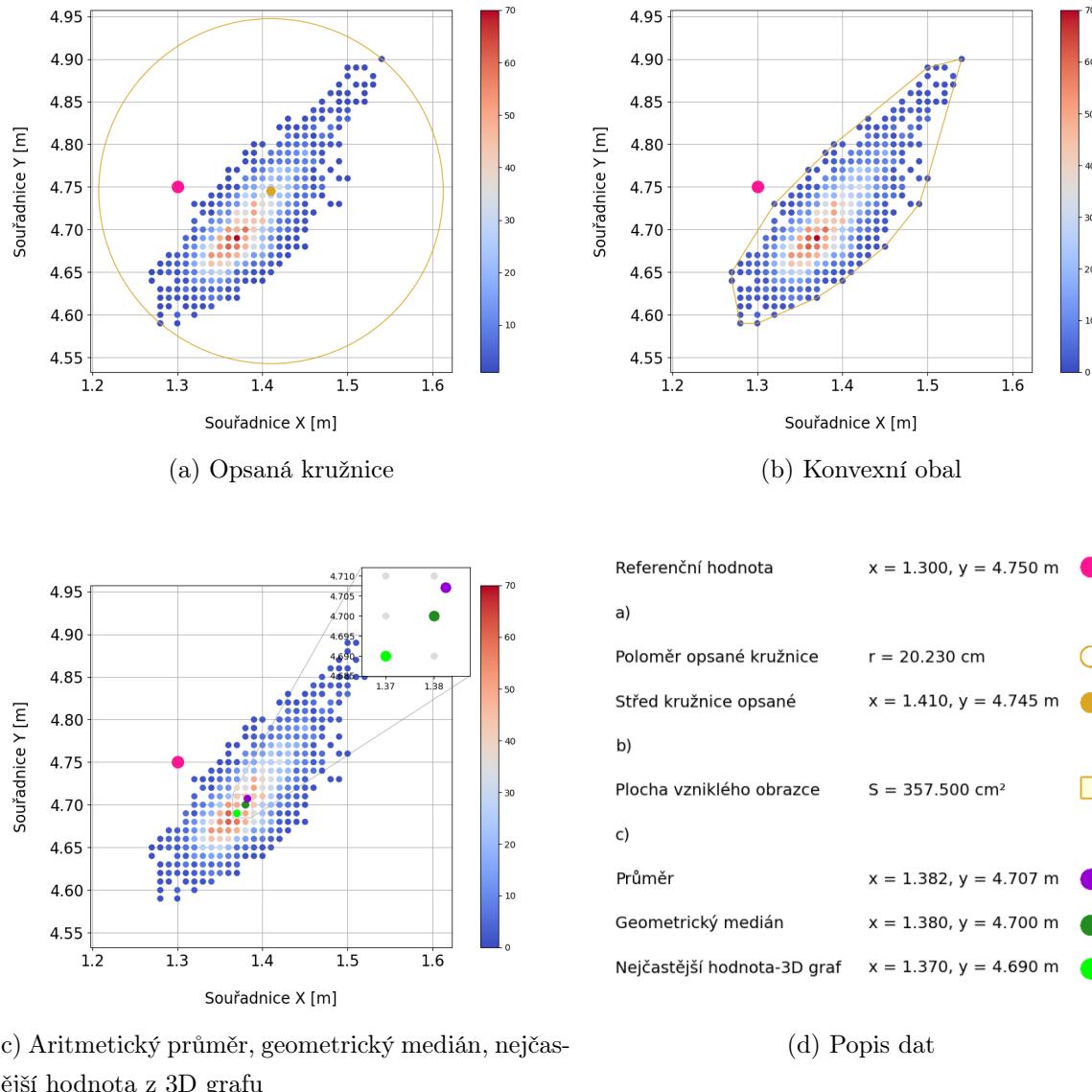
Poloha 2: Měření první

Toto měření znázorňuje data nezatížená rušením z dynamometru. Lokalizační zařízení se při tomto měření nacházelo přímo na skříni dynamometru. Soubor s naměřenými body celkově čítal 3 508 záznamů. Po redukci opakujících se záznamů vznikl soubor s 298 jedinečnými souřadnicemi bodů. Výsledný 3D graf a pohledy do jednotlivých rovin pro tyto data jsou ukázány na obr 6.24.



Obrázek 6.24: Vyhodnocení 3D graf - první (nezarušené) měření poloha 2

Grafické znázornění bodů ve 2D, včetně referenční hodnoty a ostatních bodů je na dalších obrázcích.



Obrázek 6.25: 2D Vyhodnocení - první (nezarušené) měření poloha 2

Analyticky vypočtené vzdálenosti naměřeného datasetu od reference jsou uvedeny v tabulce 6.11 (a). Tabulka 6.11 (b) udává hodnoty variace a směrodatné odchyly.

Tabulka 6.11: Analytické a statistické vyhodnocení - první (nezarušené) měření poloha 2

(a) Vypočtené vzdálenosti od referenčního bodu

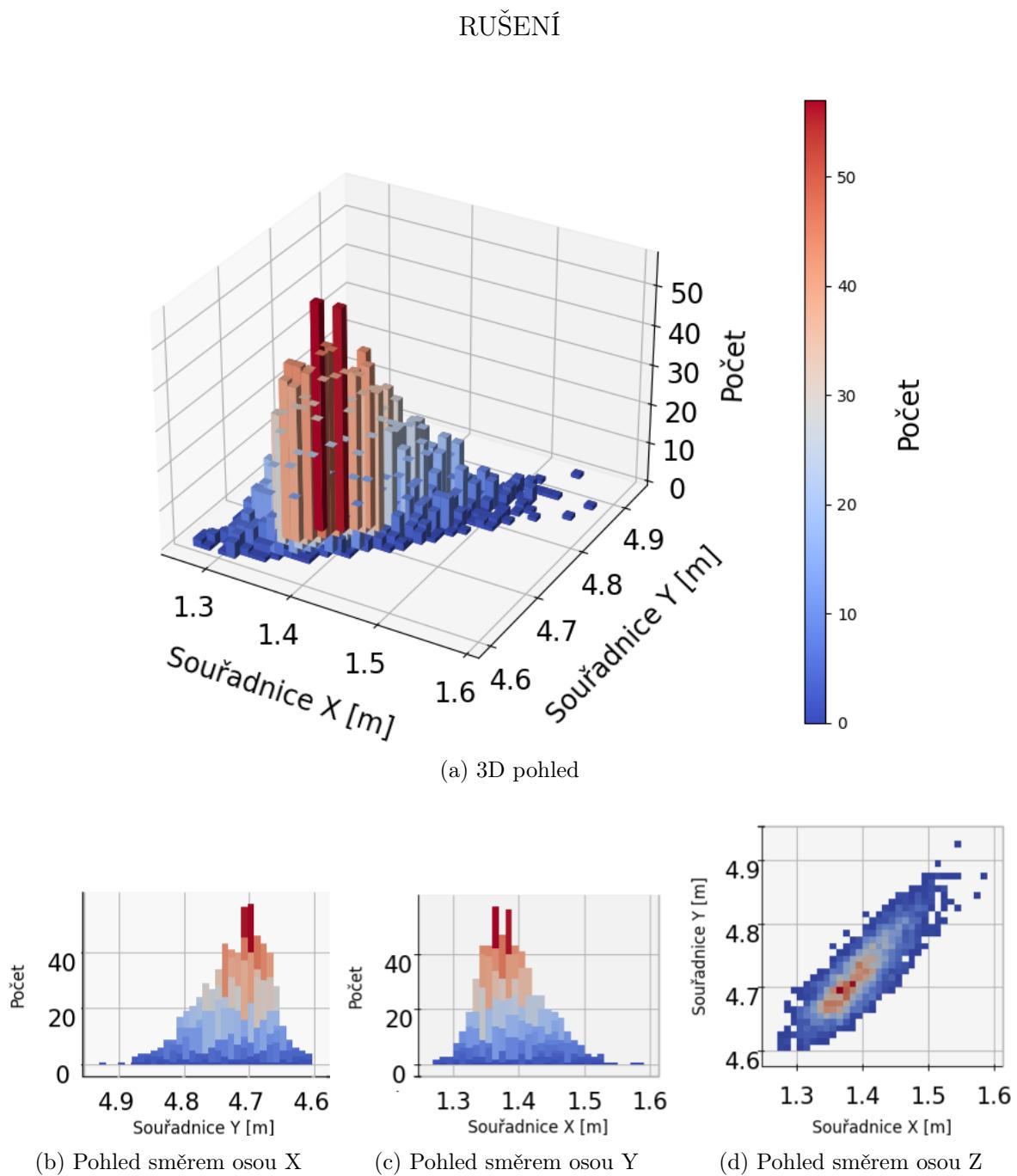
	Vzdálenost od referenční hodnoty
Geometrický medián	9.4 cm
Aritmetický průměr	9.3 cm
Nejčastější hodnota-3D graf	9.2 cm

(b) Rozptyl a směrodatná odchylka

	Osa X	Osa Y
Rozptyl	14.902 cm^2	19.963 cm^2
Směrodatná odchylka	3.860 cm	4.468 cm

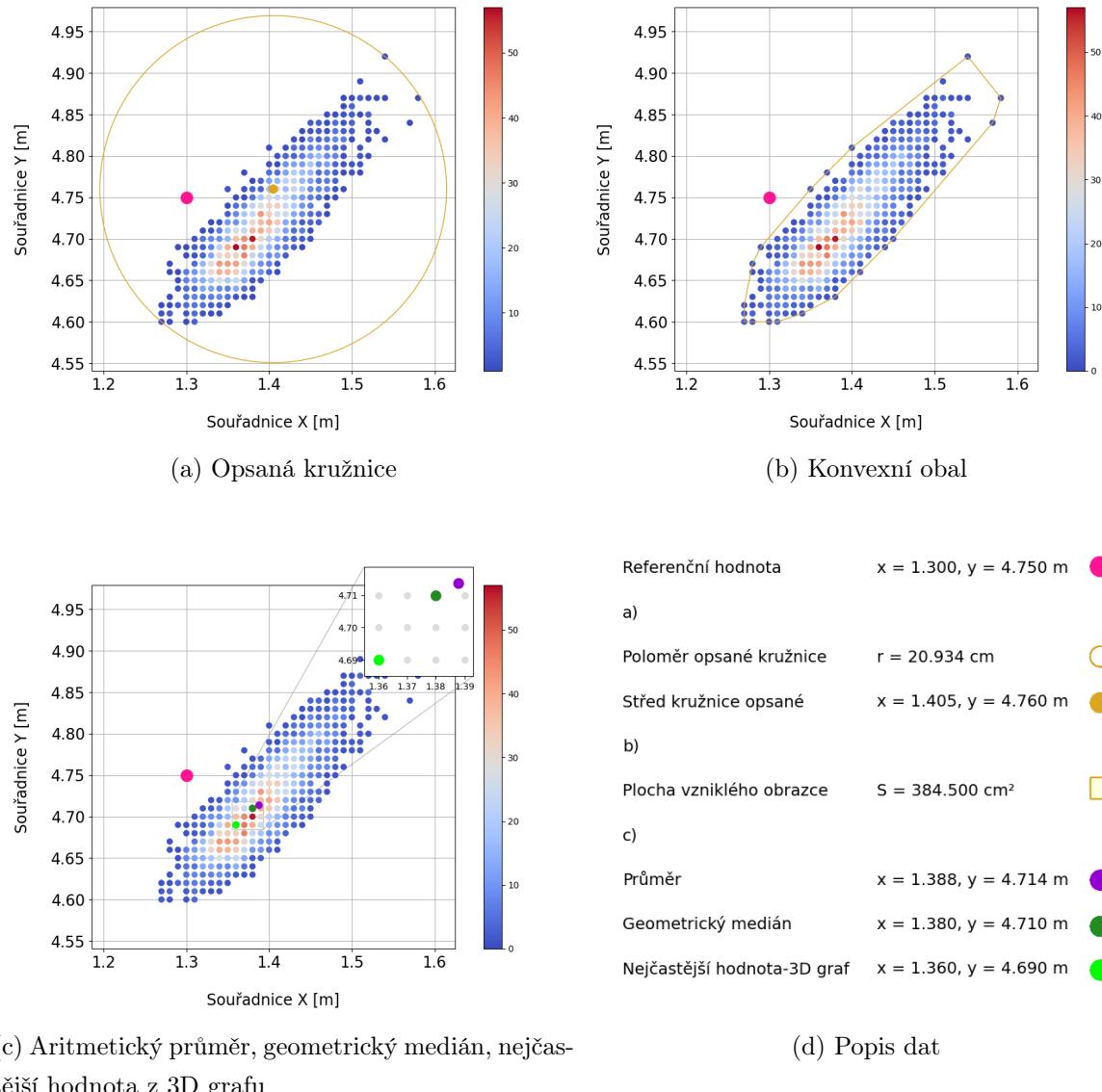
Poloha 2: Měření druhé

V případě tohoto měření je vybraná pozice tagu, z hlediska možného rušení, naprosto nejhorší variantou. Měření bylo zatíženo nejen elektromagnetickým rušením z dynamometru, ale i vibracemi z něj, neboť lokalizační zařízení bylo umístěno přímo na skříni dynamometru. Vzhledem k intenzitě generovaných vibrací byl tag připevněn ke konstrukci, aby v průběhu měření nedošlo k jeho pádu. V průběhu měření bylo zaznamenáno celkem 3 279 bodů. Po odstranění duplicitních bodů byl počet prvků souboru snížen na 302.



Obrázek 6.26: Vyhodnocení 3D graf - druhé (zarušené) měření poloha 2

Vynesení naměřených souřadnic do kartézského souřadnicového systému je na dalším obrázku. V něm jsou také vykresleny ostatní diskutované parametry.



Obrázek 6.27: 2D Vyhodnocení - druhé (zarušené) měření poloha 2

Vzdálenosti reference od bodů reprezentující naměřenou množinu jsou v tabulce 6.12 (a). Tabulka 6.12 (b) ukazuje vypočtené rozptyly a směrodatnou odchylku v osách.

Tabulka 6.12: Analytické a statistické vyhodnocení - druhé (zarušené) měření poloha 2

(a) Vypočtené vzdálenosti od referenčního bodu

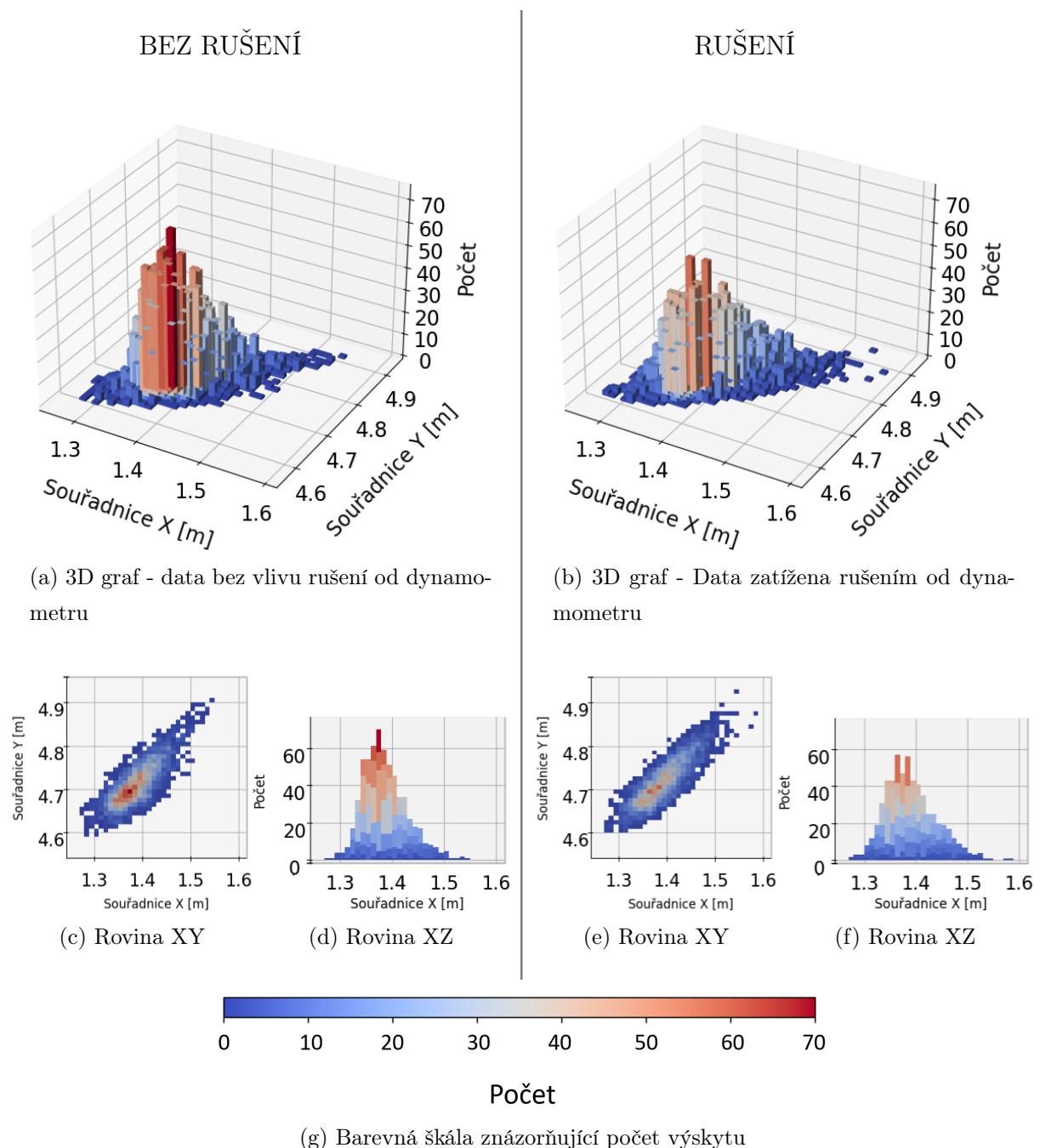
	Vzdálenost od referenční hodnoty
Geometrický medián	8.9 cm
Aritmetický průměr	9.5 cm
Nejčastější hodnota-3D graf	8.5 cm

(b) Rozptyl a směrodatná odchylka

	Osa X	Osa Y
Rozptyl	20.110 cm^2	24.766 cm^2
Směrodatná odchylka	4.484 cm	4.977 cm

6.5.4 Porovnání výsledků experimentu - poloha 2

Způsob zpracování naměřených dat je naprosto stejný způsobu, který byl použit v kapitole 6.5.2. V pravé části se nachází grafické zpracování dat, které byly shromažďovány v době, kdy byl aktivní zdroj elektromagnetického rušení a vibrací. V levé části se naopak nachází grafické ztvárnění dat, která tímto zdrojem ovlivněna nebyla.



Obrázek 6.28: Porovnání 3D grafů - poloha 2

Na první pohled je z obrázku 6.28 zjevné specifické rozmístění naměřených bodů, které se rozprostírají po pomyslné úhlopříčce roviny XY. Vykreslená zarušená data jsou, oproti datům nezarušeným, o něco více protáhlá po této fiktivní diagonále. Nicméně podobný trend lze pozorovat v obou případech měření. Na základě této skutečnosti lze vyloučit, že by byl popsaný jev způsoben rušením a vibracemi od dynamometru.

Popsaný fakt je z největší pravděpodobnosti zapříčiněn masivním železným objektem, který se nacházel zhruba uprostřed lokalizované oblasti, a tvořil tak pasivní překážku při šíření signálu. Kromě této pasivní překážky byla navíc zarušená data vystavena mnohem náročnějším podmínkám v průběhu experimentu, kdy tag a dynamometr byly vůči sobě v bezprostřední blízkosti. Výsledky měření jsou tedy ovlivněny nejen elektromagnetickým rušením, ale také vibracemi. Suma naměřených bodů u prvního měření čítá 298 bodů, zatímco u měření druhého je to 4 body více, tedy 302.

Takto simulované podmínky jsou takřka nejhorší možné, které mohou nastat, a lze proto očekávat patrně horší výsledky, než v případě vyhodnocení 6.5.2.

Statistické zpracování je provedeno ve stejném pořadí a pomocí stejných metrik jako v kapitole 6.5.2. Jako první byly pro obě měření spočítány variace a směrodatné odchylinky v ose X a Y. Odchylinky od průměrných hodnot v obou osách (tj. směrodatná odchylka) jsou v řádech jednotek centimetru. Rozptyly i směrodatné odchylinky jsou pro obě měření jsou zaneseny do tabulky 6.13.

Tabulka 6.13: Analytické a statistické vyhodnocení - porovnání měření poloha 2

	Měření 1 (M1) - nezarušená data	Měření 2 (M2) - zarušená data	Rozdíl M2 - M1
Rozptyl v ose X	14.902 cm ²	20.110 cm ²	5.208 cm ²
Rozptyl v ose Y	19.963 cm ²	24.766 cm ²	4.803 cm ²
Směrodatná odchylka osa X	3.860 cm	4.484 cm	0.624 cm
Směrodatná odchylka osa Y	4.468 cm	4.977 cm	0.509 cm

Průměrné hodnoty souřadnic X a Y pro obě měření jsou zobrazeny v další tabulce. Průměrné hodnoty souřadnic v osách velmi podobné, jsou zde nuance v jednotkách centimetru. Variační koeficient pro obě měření je zobrazen níže (tabulka 6.14).

Tabulka 6.14: Variační koeficient - porovnání měření poloha 2

	Měření 1 (M1) - nezarušená data	Měření 2 (M2) - zarušená data
Průměrná hodnota osa X	138.237 cm	138.792 cm
Průměrná hodnota osa Y	470.711 cm	471.374 cm
Variační koeficient osa X	2.792 %	3.231 %
Variační koeficient osa Y	0.949 %	1.056 %

Hodnoty variačních koeficientů jsou ve všech případech menší než 4 %. Variační koeficient z druhého měření se zvýšil oproti měření prvnímu v ose X o 0,439 %. Nárůst v ose Y je pouze o 0,107 %.

V tabulce 6.15 jsou vypočteny vzdálenosti bodů, reprezentující naměřenou množinu bodů, od referenční hodnoty pro obě měření. Poslední sloupec tabulky vyčsluje rozdíl mezi vzdálenostmi druhého a prvního měření. Záporná hodnota vzdálenosti znamená, že vzdálenost je v případě zarušených dat menší než dat nezarušených.

Tabulka 6.15: Vypočtené vzdálenosti od referenční hodnoty porovnání - poloha 2

Vzdálenost od referenční hodnoty	Měření 1 (M1) - nezarušená data	Měření 2 (M2) - zarušená data	Rozdíl M2 - M1
Geometrický medián	9.4 cm	8.9 cm	-0.5 cm
Aritmetický průměr	9.3 cm	9.5 cm	0.2 cm
Nejčastější hodnota-3D graf	9.2 cm	8.5 cm	-0.7 cm

Vypočtené vzdálenosti pro obě měření definují dosahovanou přesnost v průběhu měření. V případě prvního měření bylo dosahováno průměrné přesnosti 9,3 cm. Dosahovaná přesnost u druhého měření je překvapivě ve dvou ze tří algoritmů lepší v porovnání s měřením prvním. Průměrná dosahovaná přesnost při druhém měření je 8,9 cm.

Pomine-li se fakt, že lepší přesnost byla dosažena v případě zarušených dat, absolutní rozdíl průměrných dosahovaných přesností 0,4 cm. Tedy řádově stejně jako v případě vyhodnocení 6.5.2. Nutno znovu podotknout, že podmínky, za kterých bylo realizováno druhé měření tohoto experimentu, byly extrémně náročné.

Na základě výše popsaných metrik lze říci, že ani při tomto měření nedošlo ke fluktuaci naměřených dat vlivem stížených podmínek. S ohledem na nadmíru nepříznivé okolnosti v průběhu druhého měření, dosahují vypočtené statistické veličiny velmi kvalitních výsledků. Kvalitními výsledky se rozumí malé výsledné hodnoty použitých metrik, které vypovídají o homogenitě a konzistentnosti obou souborů.

6.6 Shrnutí experimentů

V předchozích kapitolách byla provedena analýza, zpracování a vyhodnocení dílčích měření. V této části je diskutována role zjištěných výsledků v souvislosti s technologií UWB. Jako první je zhodnocena homogenita a konzistentnost naměřených dat.

Homogenita a konzistentnost byly v dílčích měření posuzovány pomocí statistických ukazatelů variace, směrodatná odchylka a variační koeficient. Vzhledem k tomu, že všechny statistické metriky jsou spolu navzájem svázány, je homogenita a konzistentnost dat interpretována pomocí variačního koeficientu, neboť tyto vlastnosti dat jsou ve formě

variačního koeficientu nejlépe pochopitelné. Variační koeficient udává relativní míru variability dat vzhledem k průměru a lze díky němu porovnat rozptýlení dat různých datových souborů s různou střední hodnotou. Jinými slovy udává, jak velký je rozptyl ve srovnání se střední hodnotou.

Všechna naměřená data dosahovala velmi malých hodnot variačních koeficientů. A to včetně měření, při kterých bylo lokalizační zařízení vystaveno stíženým podmínkám lokalizace (elektromagnetické rušení, vibrace, pasivní překážka). Nejvyšší hodnota koeficientu variability ze všech provedených měření je rovna 3,213 %. Nicméně v zobecněném pohledu je tato hodnota rovněž chápána jako velmi malá. Takto nízké procento variability naznačuje, že naměřené soubory dat jsou relativně blízko svému průměru a mají malý rozptyl. To indikuje jednak stabilitu a malou proměnlivost dat, tak i vysokou míru konzistentnosti a homogeneity. Současně s tím všechny naměřené body mají podobné rozdělení a reprezentují stejný fenomén.

Konzistentnost dat byla dokázána i v případě měření, která byla zatížena elektromagnetickým rušením a vibracemi z dynamometru. U tohoto typu měření byla předpokládána fluktuace bodů vlivem zmíněného rušení, která ovšem nebyla potvrzena. I za těchto podmínek bylo dosaženo stabilních a homogenních výsledků a lze je tak považovat za spolehlivé.

Zjištěná homogenita a konzistentnost souboru dat vypovídá o spolehlivosti, jednotnosti a podobnosti naměřených bodů. Popsané vlastnosti se odráží v robustnosti, stabilitě a odolnosti technologie vůči okolním vlivům rušení. Z popsaných vlastností tak vyplývá významná rezistence a invariantnost technologie proti okolnímu a elektromagnetickému rušení.

Druhou stěžejní vlastností, která je v rámci této práce posuzována, je dosahovaná přesnost lokalizace. Ta je hodnocena prostřednictvím vypočtené vzdálenosti mezi referenční hodnotou a tzv. hodnotou lokalizovanou, tj. bodem, který reprezentuje soubor naměřených dat. Referenční hodnota byla fyzicky zaměřena pomocí laserového dálkoměru při realizaci experimentu. Hodnota lokalizovaná byla stanovena prostřednictvím tří algoritmů - geometrický medián, aritmetický průměr a modus (tj. nejčastěji se vyskytující souřadnice při měření). Pro každý bod určený pomocí těchto tří algoritmů byla vypočtena jeho vzdálenost od reference. Z vypočtených vzdáleností byla určena střední hodnota, která charakterizuje průměrnou dosahovanou přesnost při měření. Takto vypočtené přesnosti ze všech měření byly porovnány a z nich vybrány právě dvě, které dosahovaly nejvyšší a nejnižší hodnoty. Z těchto hodnot byl vytvořen interval, který reprezentuje rozmezí docílených přesností při realizovaných experimentech.

Výsledný rozsah přesností, kterých bylo v rámci experimentální části dosaženo, se pohybuje v rozpětí od 7,1 do 9,3 cm. Interval byl sestaven z hodnot získaných z obou pro-

vedených experimentů. Tedy experimentu realizovaného za běžných, rutinních podmínek, ale i za podmínek mnohem náročnějších, blížících se charakteru prostředí výrobní haly. Rozsah získaných přesností tak obecně popisuje fungování technologie UWB za různých podmínek.

Požadovaná přesnost lokalizace byla v úvodu práce specifikována jako 30 cm. Výsledky, kterých bylo dosaženo v průběhu měření, jsou pod stanoveným limitem. I z toho hlediska lze tedy technologii UWB shledat jako uspokojivou, neboť dosažené hodnoty přesnosti nepřesahují požadovanou přesnost lokalizace.

6.7 Test v průmyslovém prostředí

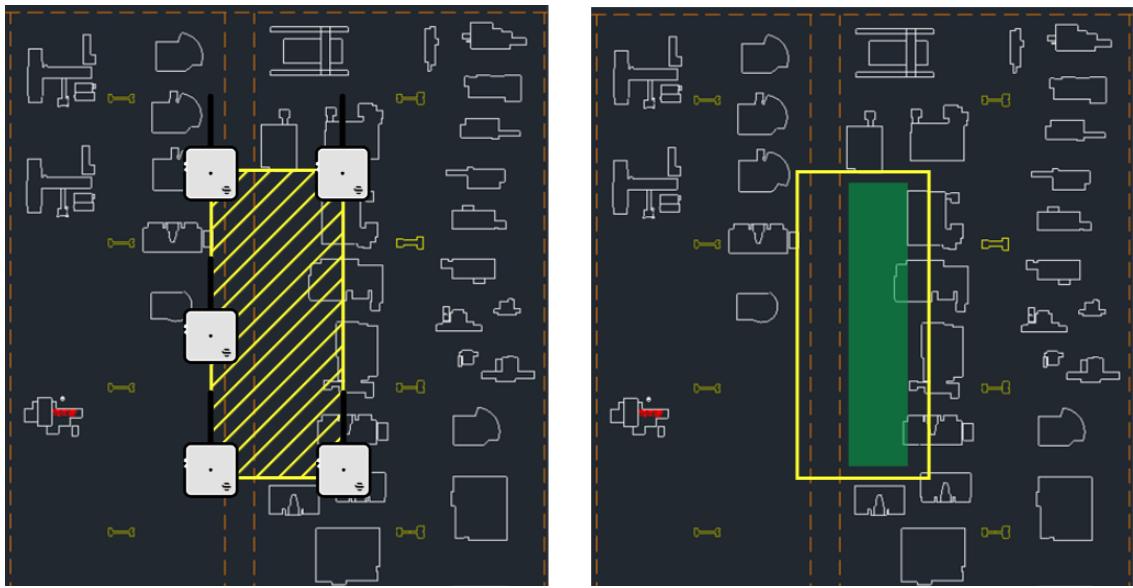
Poslední fází této práce je test technologie přímo v průmyslové hale pro verifikaci výsledků získaných v experimentální části. Provedený test se soustředil na vyzkoušení konkrétního případu užití technologie, tj. zda je možné s předdefinovanou přesností najít sledovaný díl v prostorách haly.

Funkční zkouška se uskutečnila v části výrobní haly, která je zobrazena na obrázku 6.29. Zeleně vyznačená zóna v obrázku znázorňuje odkladiště pro palety s díly. Nikde jinde, kromě tohoto vyhraněného prostoru, se palety s nářadím čekající na obrobení nesmí nacházet. Tato zóna tak reprezentuje konkrétní pracoviště, v tomto případě pracoviště CNC (Computer Numerical Control - počítačové numerické řízení) obráběcích strojů.



Obrázek 6.29: Testovací oblast

Při testování bylo použito celkem 5 kotev umístěných na tripodech (ve výšce zhruba 3,5 m) do obdélníkové geometrie. Přibližné rozmístění kotev a znázorněná lokalizovaná oblast je vidět na obrázku 6.30 (a). Obrázek 6.30 (b) také znázorňuje lokalizovanou oblast společně se zvýrazněnou zónou, která představuje místo pro odkládání palet s nářadím (tj. pracoviště CNC strojů).

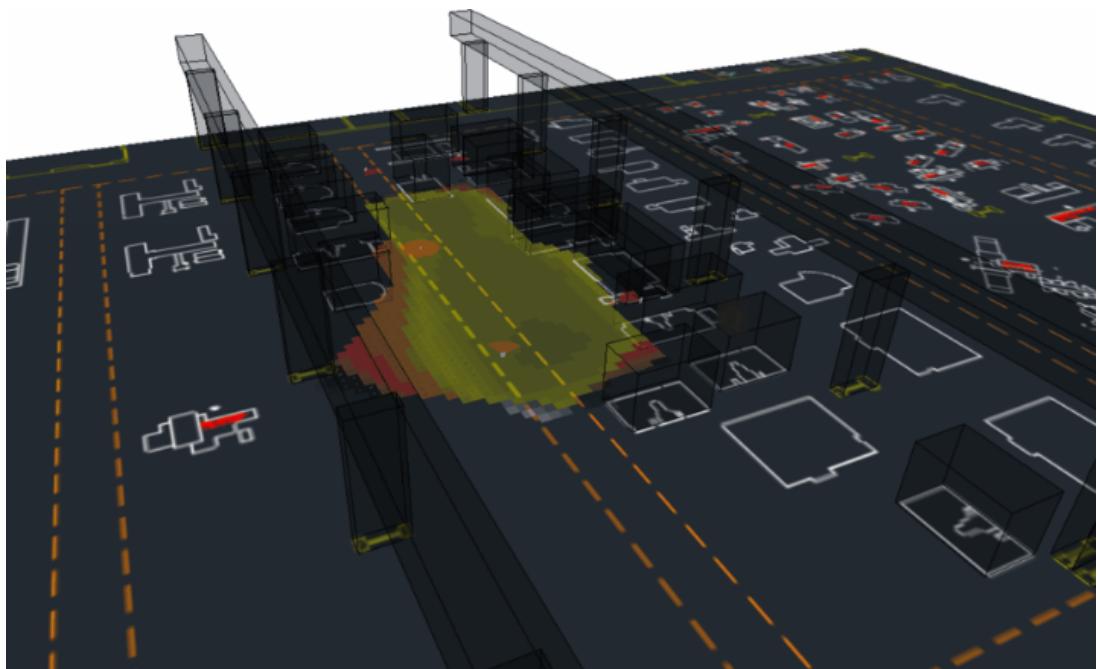


(a) Rozložení kotev, lokalizovaná oblast

(b) Lokalizovaná oblast, odkladiště pro díly

Obrázek 6.30: Půdorys testovací plochy s vyznačenými zónami

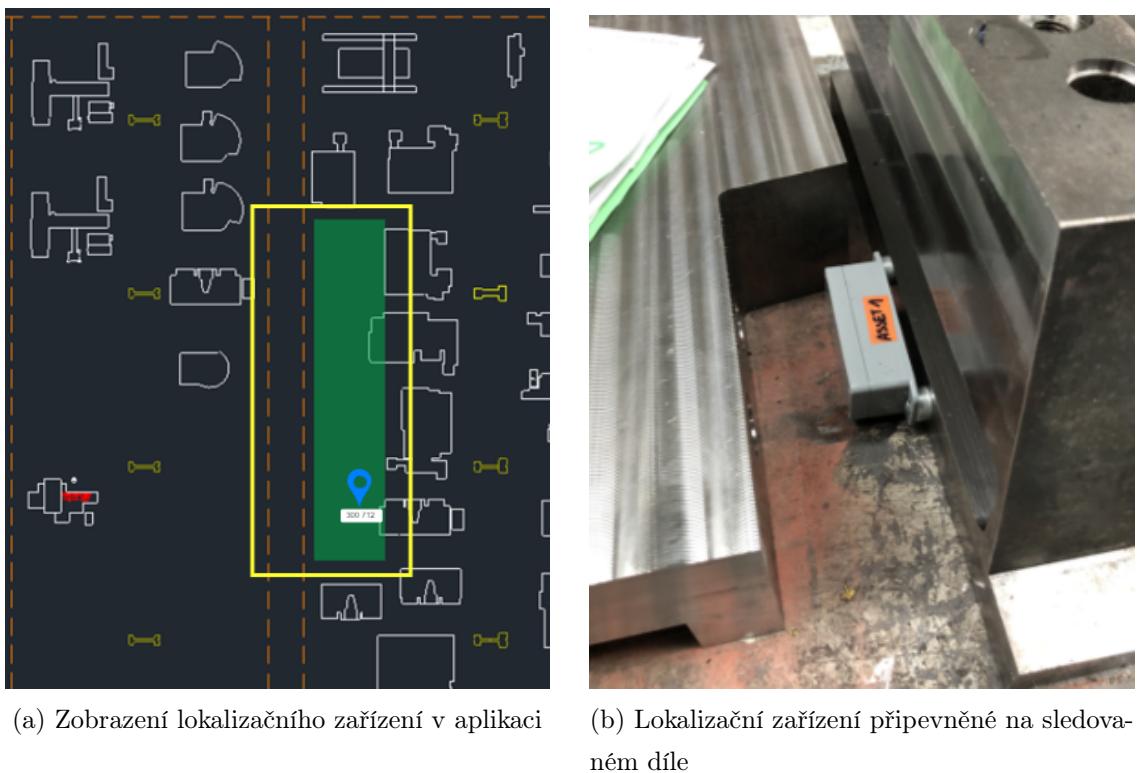
Reálné pokrytí testované oblasti je ve 3D zobrazeno na obrázku 6.31. Kvalita pokrytí je barevně rozlišena, od žluté (nejlepší) až po červenou (nejhorší). Na tomto obrázku je dobře vidět, že signál dosahuje i mezi CNC stoje a opěrné sloupy. Při reálné implementaci by kotvy nebyly umístěny na tripodech, ale na nosných sloupech haly ve výšce vyšší než je většina přítomných překážek (CNC stroje, železné kontejnery, skříně apod.). Takovýmto umístěním bude docíleno ještě lepších výsledků pokrytí mezi objekty a také celkového dosahu, který tak nebude blokován překážkami.



Obrázek 6.31: Pokrytí testovací oblasti

Cílem těchto testů bylo ověření, zda je výsledná přesnost technologie ve výrobní hale dostačují a je možné na tomto základě identifikovat a přesně lokalizovat hledaný díl.

V průběhu testu bylo lokalizační zařízení pomocí magnetů připevněno na nářadí ležící na paletě, viz obrázek 6.32 (b), a umístěno ve sledované zóně, obrázek 6.32) (a). Blízká obráběcí centra byla přitom celou dobu v provozu. Pomocí aplikace byl vyhledán tag, který identifikoval sledovaný díl, a byla nalezena jeho aktuální poloha. Poskytnuté informace o poloze postačily k tomu, že byl sledovaný díl ihned bez problémů nalezen.

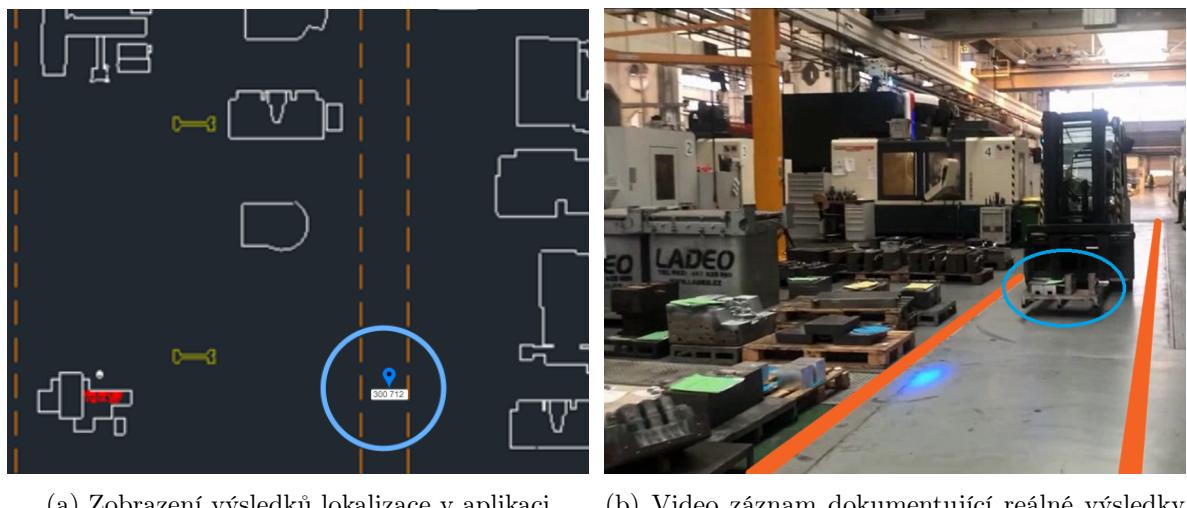


Obrázek 6.32: Umístění lokalizačního zařízení

Takto nalezené nářadí s lokalizačním zařízením bylo následně vysokozdvižným vozíkem přepraveno z aktuálně nalezeného místa na konec pokryté oblasti a zpět na výchozí (původní) polohu. V průběhu manipulace s nářadím byla stále v provozu všechna obráběcí CNC centra a navíc nad sledovanou oblastí přejížděl portálový jeřáb. Popsaná situace, kdy je používán jednak portálový jeřáb, všechna obráběcí centra a nářadí je převáženo vysokozdvižným vozíkem představuje běžné podmínky ve výrobní hale a všechny zmíněné nepříznivé vlivy mohou tvořit potencionální překážky (limity) pro fungování technologie.

Nicméně v průběhu přepravy dílu za popsaných podmínek nedošlo k žádnému znatelnému vychýlení identifikátoru pozorovaného v aplikaci (obrázek 6.33 (a)) od reálné polohy pohybujícího se dílu (obrázek 6.33 (b)). Z celého procesu byl pořízen video záznam, který je dostupný v přiloženém CD.

Obrázek 6.33 zachycuje ukázkou videa a také způsob jeho zpracování. V levé části videa je zobrazen část půdorysu haly v aplikaci znázorňující vypočtenou polohu lokalizovaného objektu. V pravé části je potom záznam videa dokumentující celou popsanou situaci pořízený v průběhu zkoušky.



(a) Zobrazení výsledků lokalizace v aplikaci (b) Video záznam dokumentující reálné výsledky lokalizace

Obrázek 6.33: Záznam pořízený v průběhu zkoušky

Tato funkční zkouška sloužila jako demonstrace funkčnosti technologie UWB přímo na hale. Výsledky, kterých zde bylo dosaženo, jsou velmi uspokojivé a potvrzují, že s využitím technologie UWB je možné s požadovanou přesností lokalizovat a identifikovat hledaný objekt v prostorách nářadovny.

Získané výsledky jsou v souladu se závěry, které byly vyvozeny v experimentální části a znovu potvrzují přesnost, robustnost a odolnost technologie vůči nepříznivým vlivům, které se vyskytují na hale.

Kapitola 7

Závěr

Cílem této práce byl návrh lokalizačního řešení, které je vhodné pro aplikaci ve výrobní hale, na základě definovaných požadavků. Nedílnou součástí práce byl výběr, otestování a podrobení zvolené technologie praktickým zkouškám, které měly ověřit použitelnost technologie v průmyslovém prostředí.

Technologie byla vybírána tak, aby vyhovovala všem kritériím, které byly specifikovány v úvodu práce, nebo které vyplývají z podstaty fungování výrobních procesů na hale. Jako první byla provedena rešerše v oblasti dostupných technologií, které splňovaly všechny stanovené náležitosti. Z těchto technologií byla následně zvolena technologie UWB, jakožto nejlepší kandidát mezi všemi zkoumanými možnostmi.

Po fázi výběru konkrétní technologie následovalo její ověření. Zda splňuje všechny vlastnosti, které jsou uváděny v dostupné teoretické literatuře, a je tak aplikovatelná k lokalizaci uvnitř průmyslových objektů. K realizaci tohoto kroku bylo nezbytné zajistit hardwarové komponenty založené na modulu UWB. Za pomoc firmy Sewio, která zapůjčila zmíněný hardware, bylo možné tento krok uskutečnit. Pro práci se zapojeným vybavením byly v programovacím jazyku Python sestaveny potřebné programy.

Následně byly provedeny experimenty, které měly prověřit funkčnost technologie z hlediska dvou rozhodujících parametrů, přesnost a odolnost technologie proti rušení. Naměřená data z experimentů byla zpracována a vyhodnocena. Pro analýzu a vyhodnocení všech naměřených dat byly navrženy a v jazyku Python naprogramovány konkrétní vyhodnocovací algoritmy.

Při všech experimentech s technologií UWB bylo dosahováno velmi kvalitních výsledků, ať už z hlediska dosahované přesnosti nebo rezistence a robustnosti technologie. Vyvozené závěry jsou podloženy statistickými, matematickými nebo číselnými údaji, které jsou popsány v kapitolách 6.4 Experiment v laboratoři robotů a 6.5 Experiment v laboratoři elektromotorů. Získané výsledky tak korespondují s vlastnostmi, které byly uváděny v teoretické literatuře.

Rozsah přesností, kterých bylo v průběhu experimentů dosaženo, jsou uvedeny ve společné tabulce 7.1.

Tabulka 7.1: Shrnutí dosažených přesností

Experiment v laboratoři robotů	
	Vzdálenost od referenční hodnoty [cm]
Poloha 1 (nejlepší dosažená přesnost)	7.5
Poloha 2 (nejhorší dosažená přesnost)	8.6
Experiment v laboratoři elektromotorů	
	Vzdálenost od referenční hodnoty [cm]
	Měření 1 (nerušené) Měření 2 (zarušené)
Poloha 1 (nejlepší dosažená přesnost)	7.1 7.7
Poloha 2 (nejhorší dosažená přesnost, překážka)	9.3 8.9

Pro verifikaci výsledků získaných v rámci experimentální části byla rovněž uskutečněna funkční zkouška technologie UWB přímo ve výrobní hale Škoda Auto. Při této zkoušce byly potvrzeny výsledky z provedených experimentů a technologie i při tomto testu dosahovala velmi uspokojivých výsledků, které přesahovaly rámec definovaných požadavků.

Na základě všech získaných výsledků je možné technologii UWB kvalifikovat jako vhodnou pro lokalizaci nářadí uvnitř výrobní haly na základě popsaných kritérií.

Příloha A

Zpracování naměřených dat

Příloha B

CD

Bibliografie

- [1] T. Sanpechuda a L. Kovavisaruch, “An approach to RTLS selection,” in *Proceedings of the 24th International Conference on Production Research*, sv. 10, Poznan, Poland: DEStech Publications, 2017, s. 13–18.
- [2] P. Nowotarski, J. Pasławski, M. Skrzypczak a R. Krygier, “RTLS systems as a Lean Management tool for productivity improvement,” in *Proceedings of the 34rd ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, sv. 34, Taipei, Taiwan: IAARC Publications, 2017, s. 1037–1044.
- [3] M. N. Kamel Boulos a G. Berry, “Real-time locating systems (RTLS) in healthcare: a condensed primer,” *International journal of health geographics*, roč. 11, č. 25, s. 1–8, 2012.
- [4] Antonín Vojáček, *RTLS průmyslové sledování polohy s UWB technologií*, In: automatizace.hw.cz [online]. URL: <https://automatizace.hw.cz/rtls-prumyslove-sledovani-polohy-s-uwb-technologii.html> (cit. 25.05.2023).
- [5] S. Thiede, B. Sullivan, R. Damgrave a E. Lutters, “Real-time locating systems (RTLS) in future factories: technology review, morphology and application potentials,” *Procedia CIRP*, roč. 104, s. 671–676, 2021.
- [6] Jay Palter, *Ultimate Real-Time Location System (RTLS) Tech Guide*, In: realtimenetworks.com [online]. URL: <https://www.realtimenetworks.com/blog/ultimate-2019-real-time-location-system-rtls-tech-guide> (cit. 25.05.2023).
- [7] Z. Farid, R. Nordin, M. Ismail et al., “Recent advances in wireless indoor localization techniques and system,” *Journal of Computer Networks and Communications*, roč. 2013, s. 185 138, 2013, ISSN: 2090-7141.
- [8] T. Sanpechuda a L. Kovavisaruch, “A review of RFID localization: Applications and techniques,” in *5th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, sv. 2, Krabi, Thailand: IEEE, 2008, s. 769–772, ISBN: 978-1-4244-2101-5.
- [9] L. Bai, F. Ciravegna, R. Bond a M. Mulvenna, “A Low Cost Indoor Positioning System Using Bluetooth Low Energy,” *IEEE Access*, roč. 8, s. 136 858–136 871, 2020.
- [10] M. Asaduzzaman, T. K. Geok, S. Sayeed, M. A. Bari, F. Hossain a T. C. Peng, “A comparative survey on indoor object location tracking techniques and technologies,” in *10th International Conference on System Engineering and Technology (ICSET)*, Shah Alam, Malaysia: IEEE, 2020, s. 79–84.
- [11] C.-C. Pu, C.-H. Pu a H.-J. Lee, “Indoor Location Tracking Using Received Signal Strength Indicator,” in *Emerging Communications for Wireless Sensor Networks*, IntechOpen, 2011, kap. 11.

- [12] R. Dalce, T. Val a A. V. Bossche, “Comparison of indoor localization systems based on wireless communications,” *Wireless Engineering and Technology*, roč. 2, č. 4, s. 240–256, 2011.
- [13] D. Čabarkapa, I. Grujić a P. Pavlović, “Comparative analysis of the Bluetooth Low-Energy indoor positioning systems,” in *12th International Conference on Telecommunication in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services (TELSIKS)*, Nis, Serbia: IEEE, 2015, s. 76–79.
- [14] F. Zafari, A. Gkelias a K. K. Leung, “A Survey of Indoor Localization Systems and Technologies,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, roč. 21, č. 3, s. 2568–2599, 2019.
- [15] K. Cho, W. Park, M. Hong et al., “Analysis of latency performance of Bluetooth low energy (BLE) networks,” *Sensors*, roč. 15, č. 1, s. 59–78, 2015, ISSN: 1424-8220.
- [16] F. Lassabe, P. Canalda, P. Chatonnay a F. Spies, “Indoor Wi-Fi positioning: techniques and systems,” *annals of telecommunications-annales des télécommunications*, roč. 64, č. 9-10, s. 651, 2009.
- [17] Z. Silvia, C. Martina, S. Fabio a P. Alessandro, “Ultra Wide Band Indoor Positioning System: analysis and testing of an IPS technology,” *IFAC*, roč. 51, č. 11, s. 1488–1492, 2018, ISSN: 2405-8963.
- [18] Samantha Morehead, *How to Pick the Best Bluetooth Protocol for Your Application*, In: mwrf.com [online], 18.07.2019. URL: <https://www.mwrf.com/technologies/systems/article/21849843/how-to-pick-the-best-bluetooth-protocol-for-your-application> (cit. 21.05.2023).
- [19] Dr. Frederic Nabki, *What's the Difference Between Bluetooth and UWB for High-Speed Data and Multimedia?* In: electronicdesign.com [online], 26.09.2021. URL: <https://www.infsoft.com/basics/positioning-technologies/ultra-wideband/> (cit. 21.05.2023).
- [20] A. A. Kalbandhe a S. C. Patil, “Indoor positioning system using bluetooth low energy,” in *International Conference on Computing, Analytics and Security Trends (CAST)*, Pune, India: IEEE, 2016, s. 451–455.
- [21] K. Szyc, M. Nikodem a M. Zdunek, “Bluetooth low energy indoor localization for large industrial areas and limited infrastructure,” *Ad Hoc Networks*, roč. 139, s. 103 024, 2023, ISSN: 1570-8705.
- [22] Antonín Vojáček, *Používané RFID frekvence a jejich vliv na čtení a zápis tagu*, In: automatizace.hw.cz [online], 1.09.2015. URL: <https://automatizace.hw.cz/komponenty-prumyslove-sbernice-a-komunikace/vice-i-mene-bezne-rfid-frekvence-a-jejich-vliv-na-vlastnosti-tagu.html> (cit. 20.05.2023).
- [23] A. Diallo, Z. Lu a X. Zhao, “Wireless Indoor Localization Using Passive RFID Tags,” *Procedia Computer Science*, roč. 155, s. 210–217, 2019, ISSN: 1877-0509.
- [24] Jennifer Halstead, *Active RFID Technology and Real-Time Location Systems*, In: link-labs.com [online], 13.11.2020. URL: <https://www.link-labs.com/blog/facts-active-rfid-technology-rtls> (cit. 25.05.2023).
- [25] C. Li, L. Mo a D. Zhang, “Review on UHF RFID Localization Methods,” *Journal of Radio Frequency Identification*, roč. 3, č. 4, s. 205–215, 2019, ISSN: 2469-7281.

- [26] Mark Roberti, *What Is the Location Accuracy of an RFID System?* In: rfidjournal.com [online], 2020. URL: <https://www.rfidjournal.com/question/what-is-the-location-accuracy-of-an-rfid-system> (cit. 25.05.2023).
- [27] Bart Ivy, *RTLS Technology Comparison*, In: awareinnovations.com [online], 3.03.2021. URL: <https://www.awareinnovations.com/2021/03/03/rtls-technology-comparison/> (cit. 25.05.2023).
- [28] Mark Roberti, *What Affects the Performance of UHF RFID Readers?* In: rfidjournal.com [online], 2014. URL: <https://www.rfidjournal.com/question/what-affects-the-performance-of-uhf-rfid-readers> (cit. 20.05.2023).
- [29] Mapsted, *UWB Positioning Explained*, In: mapsted.com [online], 16.02.2021. URL: <https://mapsted.com/blog/uwb-positioning-explained/> (cit. 22.05.2023).
- [30] I. Oppermann, M. Hämäläinen a J. Iinatti, *UWB: theory and applications*. Finland: John Wiley & Sons, 2004, ISBN: 0-470-86917-8.
- [31] Infsoft, *Ultra-Wideband*, In: infsoft.com [online]. URL: <https://www.infsoft.com/basics/positioning-technologies/ultra-wideband/> (cit. 21.05.2023).
- [32] Sewio, *Tag Battery Lifetime*, In: sewio.net [online]. URL: <https://docs.sewio.net/docs/tag-battery-lifetime-3244819.html> (cit. 26.05.2023).
- [33] Sewio, *LOS vs NLOS*, In: sewio.net [online]. URL: <https://docs.sewio.net/docs/los-vs-nlos-25593229.html> (cit. 26.05.2023).
- [34] Sewio, *2nd Difference*, In: sewio.com [online]. URL: <https://docs.sewio.net/docs/2nd-difference-25593247.html> (cit. 02.05.2023).
- [35] Sewio, *RSSI*, In: sewio.net [online]. URL: <https://docs.sewio.net/docs/rssи-25593236.html> (cit. 26.05.2023).
- [36] Sewio, *First Path*, In: sewio.net [online]. URL: <https://docs.sewio.net/docs/first-path-25593240.html> (cit. 26.05.2023).
- [37] Sewio, *Motion Detection and Sleep Modes*, In: sewio.net [online]. URL: <https://docs.sewio.net/docs/motion-detection-and-sleep-modes-3244808.html> (cit. 26.05.2023).